

# **Versuche zum Tragverhalten von ultra hochfestem Beton**

## **Teil 1 – Materialversuche**

**Institut de structures – Construction en béton**

**Dipl. Ing. Jörg Jungwirth  
Prof. Dr. Aurelio Muttoni**

**Projekt 00.02, Bericht 00.02.R3 März 2004**





# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Zielsetzung und Konzept.....</b>	<b>9</b>
2.1	<i>Versuchserien.....</i>	<i>9</i>
2.2	<i>Versuchsserie Material .....</i>	<i>11</i>
<b>3</b>	<b>Werkstoff .....</b>	<b>13</b>
3.1	<i>Betonzusammensetzung.....</i>	<i>13</i>
3.2	<i>Probenherstellung.....</i>	<i>13</i>
3.3	<i>Betonprüfung.....</i>	<i>14</i>
<b>4</b>	<b>Druckversuche.....</b>	<b>20</b>
4.1	<i>Zylinderdruckversuch.....</i>	<i>20</i>
4.2	<i>Würfeldruckversuche .....</i>	<i>24</i>
4.3	<i>Stempeldruckversuche.....</i>	<i>27</i>
4.4	<i>Vergleich Würfel-, Zylinder- und Stempeldruckfestigkeit.....</i>	<i>29</i>
<b>5</b>	<b>Zugversuch .....</b>	<b>32</b>
5.1	<i>Zugversuche mit konstantem Querschnitt.....</i>	<i>32</i>
5.2	<i>Zugversuche mit gekerbter Probe.....</i>	<i>41</i>
<b>6</b>	<b>Biegeversuch.....</b>	<b>49</b>
6.1	<i>Vier – Punkt Biegeversuch.....</i>	<i>49</i>
6.2	<i>Drei – Punkt Biegeversuch .....</i>	<i>59</i>
<b>7</b>	<b>Versuche mit Bewehrungselementen .....</b>	<b>62</b>
7.1	<i>Zugversuche Bewehrungsstahl.....</i>	<i>62</i>
7.2	<i>Bewehrungsausziehversuch .....</i>	<i>63</i>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>69</b>
	<b>Danksagung .....</b>	<b>69</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>Error! Bookmark not defined.</b>





# 1 ZUSAMMENFASSUNG

Durch Optimierung der Betonrezeptur und Zugabe von Stahlfasern wurde von der Zementindustrie ein neuer, sehr leistungsfähiger zementöser Werkstoff, der UltraHochFeste FaserBeton, entwickelt. Die Werkstoffeigenschaften des UHFB und somit das Tragverhalten der aus ihm gefertigten Bauteile, weichen stark von denen des traditionellen Betons ab. Um Aussagen über geeignete Tragsysteme und Konzepte für den Entwurf von statisch effektiven Tragwerken aus UHFB machen zu können, sind zunächst grundlegende Studien seiner speziellen Materialeigenschaften nötig.

Mit den in diesem Bericht dargestellten Versuchen wird das mechanische Materialverhalten von ultrahochfestem Faserbeton analysiert. Basierend auf die hier gewonnen Erkenntnisse, wird im Rahmen der Forschungsarbeit „unterspannte Träger aus UHFB“ ein Modell zur Beschreibung des Tragverhaltens von Tragwerken aus UHFB entwickelt.

In Kapitel 2 werden die Zielsetzung und das Konzept der Versuche erläutert. Kapitel 3 beschreibt den verwendeten Werkstoff legt die Methodik zur Überwachung gleich bleibender Werkstoffeigenschaften dar. Die Versuche zur Ermittlung der Werkstoffeigenschaften werden in Kapitel 4 Druckversuche, Kapitel 5 Zugversuche und Kapitel 6 Biegeversuche beschrieben. Ergänzt werden die Materialversuche durch Ausziehversuche zur Untersuchung des Verbundes zwischen UHFB verschiedenen Bewehrungselementen in Kapitel 7.

## WERKSTOFF

Die Versuche werden mit dem ultrahochfesten Beton BSI®/CERACEM der Firmen SIKA und EIFFAGE durchgeführt, welcher als fertig konfektionierter Premix geliefert wird. Dieser UHFB weist im Vergleich zu heute üblichen UHFBe eine relativ grobe Kornstruktur und grosse Faserdurchmessern auf.

UHFB ist sehr sensibel bezüglich der genauen Dosierung der Inhaltstoffe wie auch der akkurat einzuhaltenden Mischprozedur. Mit Hilfe einer systematischen Betonprüfung, konnten gleich bleibende Materialeigenschaften der einzelnen Mischerchargen sichergestellt werden. Für zukünftige Versuchsserien sollte das angewendete Prüfverfahren noch optimiert werden. Es sind einerseits grössere Prüfkörper vorzusehen (Homogenität bei 3 Punkt Biegeversuch), anderseits ist eine Trennung der Probekörper für Zug und Druckversuchen anzustreben (Vorschädigung der Probe).

## DRUCKVERSUCHE

Bei den Druckversuchen hat sich gezeigt, dass die Faserbewehrung bei druckbelasteten Proben im Gebrauchszustand keinen weiteren Einfluss hat. Jedoch wird die Festigkeit durch die Fasern erhöht. Die Fasern haben eine umschnürende Wirkung (Mikrobewehrung) womit die Querdehnung behindert wird und sich ein 3-achsiger Spannungszustand ausbildet. Nach dem Bruch ergibt sich durch die Fasern eine hohe Resttragfähigkeit.

Der Verlauf der Spannungs – Dehnungskurve der hier betrachteten Zylinderdruckprobe aus UHFB kann wie folgt abstrahiert werden (Bild 1):

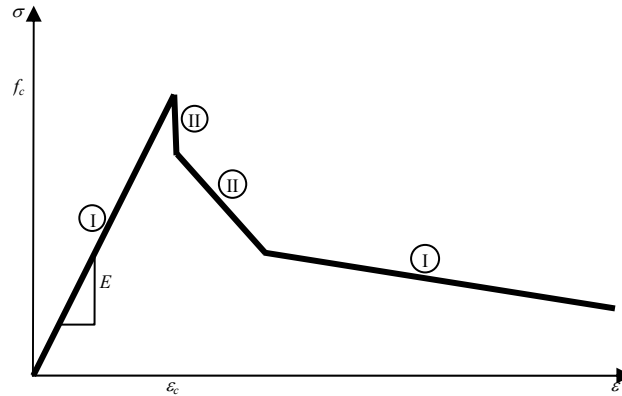


Bild 1: Schematisierte Spannungs – Dehnungskurve des Druckverhaltens der getesteten Druckzylinder aus UHFB

Phase I: Linear - elastische Verformung - Zementmatrix ungerissen

Phase II: Schlagartige Rissbildung – diagonale Schubrisse; Ausbildung von einzelnen Betonschuppen die untereinander noch mit Fasern verbunden sind – Fasern fangen das Ineinanderschieben der Schollen ab

Phase III: Langsames Zerstören der Faserbrücken durch Abscheren, Ausreissen und Abplatzen der Zementmatrix an den Fasermündungen.

Phase IV: Zermalmen des restlichen Betons

Der Vergleich verschiedener Druckprobekörpergeometrien hat gezeigt, dass die Homogenität der Matrix und die beigemischten Fasern (umschnürende Wirkung) einen Einfluss auf den Formfaktor zur Umrechnung der Festigkeit verschiedener Probekörperformen haben. Aufgrund der Fasern bildet sich ein dreiaxialer Spannungszustand im gesamten Probekörper und nicht nur im Bereich über den Lasteinleitungsplatten aus. Der Einfluss der Querausdehnungsbehinderung im Lasteinleitungsbereich verliert in Relation zur Festigkeit der gesamten Probe an Gewicht. Folglich hat die Form (Schlankheit) im Vergleich zu Normalbeton einen geringeren Einfluss auf die Festigkeit der Probe.

Bezüglich des Massstabeffekts verschieden grossen Probekörpern kann Grundsätzlich festgestellt werden, dass durch die grössere Homogenität des UHFB trotz seines spröden Verhaltens ein geringerer Massstabeffekt resultiert.

## ZUGVERSUCH

Bei den durchgeführten Zugversuchen zeigt sich nach Rissbildung der Matrix ein verfestigendes Verhalten des UHFB in Verbindung mit einer Multirissbildung. Die Festigkeit des Querschnittes im gerissenen Zustand ergibt sich aus dem Haftverbund zwischen Matrix und Faser, der Verbundfläche (Fasermenge, -länge und -durchmesser) und einem Faktor für die Wirksamkeit der Fasern. Nach Überschreiten der Verbundfestigkeit der Fasern in einem der Multirisse kommt es zur Lokalisierung der Rissbildung auf einen, sich in Folge bis zum kompletten Versagen öffnenden Makroriss.

Mit den Zugversuchen mit gekerbter Probe wird das Rissöffnungsverhalten und das Ausreissen der Fasern näher untersucht. Während der Rissöffnung versagt sukzessive der Haftverbund der einzelnen Fasern. Beim untersuchten UHFB versagen die Fasern ausschliesslich durch Überschreiten der Verbundspannung zwischen Faser und Matrix. Auch nachdem eine Faser die Haftzugspannung überschritten hat, kann sie weiterhin durch Gleitverbund zur Rissüberbrückung beitragen. Durch ihre glatte Oberfläche können hierbei aber nur sehr geringe Verbundspannungen übertragen werden.

Aus den beobachteten Phänomenen wird gefolgert, dass bezüglich des Verbundverhaltens zwischen Faser und Matrix bei UHFB im Vergleich zu normalen Faserbetonen der Haftreibungsanteil gegenüber dem Gleitreibungsanteil überwiegt. Für die Modellierung ist diese hohe Haftverbundfestigkeit entsprechend zu berücksichtigen.

Das Verhalten der in der Versuchsreihe getesteten Zügelemente aus UHFB lässt sich wie folgt schematisch darstellen (Bild 2):

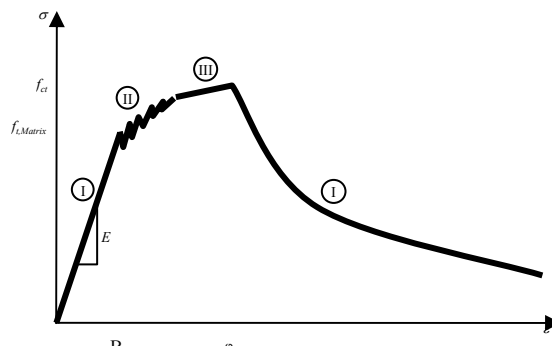


Bild 2: Schematisiertes Verhalten Zugverhalten der getesteten Proben aus UHFB

Phase I: Linear-elastische Verformung - Zementmatrix ungerissen

Phase II: Multirissbildung von Mikrorissen – verfestigendes Verhalten

Phase III: Öffnung zu Messorissen – aktivieren der Fasern bis zum Ausriss der Fasern

Phase IV: Öffnen von einem oder mehrerer Makrorissen – fortschreitender Ausriss der Fasern

Die Form der Kurve scheint grundsätzlich für alle faserverstärkten ultrahochfesten Betone ähnlich zu sein, nur die Ausbildung der einzelnen Phasen (Steigung, Länge) variiert in Abhängigkeit der Zusammensetzung des jeweiligen UHFB.

#### BIEGEVERSUCHE

Der Biegezugversuch wird allgemein als Ersatz für den sehr viel schwieriger durchzuführenden axialen Zugversuch genutzt. Mit diesem können sehr einfach Vergleichswerte für verschiedene UHFBe ermittelt werden. Mit Hilfe von Umrechnungsfaktoren ist es möglich, aus der Biegezugfestigkeit auf eine axiale Zugfestigkeit zu schliessen.

Es kann festgestellt werden, dass bei rechteckigen Querschnitten der UHFB bei Biegebelastung ein sehr ineffizientes Tragverhalten aufweist. Durch den grossen Unterschied zwischen Zug – und Druckfestigkeit wird die hohe Druckfestigkeit nicht ausgenutzt, da die Druckzone nur wenige Prozent der Querschnittshöhe darstellt.

#### VERSUCHE MIT BEWEHRUNGSELEMENTEN

Mit Ausziehversuchen von Bewehrungselementen (Bewehrungsstäbe und Spannlitzen) wird das Verbundverhalten von UHFB untersucht. Der Bewehrungsstahl stützt sich mit seinen Rippen gegen den Beton ab, wodurch eine sehr viel höhere Festigkeit als alleine durch den Haftverbund erreicht werden kann. Das Versagen tritt letztendlich durch Abscheren der Betonelemente zwischen den Rippen ein. Es ergibt sich für den hier getesteten UHFB eine mittlere Verbundspannung von rund  $f_b = 59 \text{ MPa}$ . Die gemessene Verbundspannung liegt somit sehr viel höher als die eines typischen Normalbetons.

Bei den Spannlitzen versagt der Haftverbund zwischen den glatten Drähten und der Betonmatrix sehr früh (13 MPa). Es folgt eine Phase mit einem relativ grossen Schlupf, in der in erster Linie Gleitreibung vorherrscht. Durch die helixförmige

Struktur verdreht sich die Litze bei fortschreitendem Schlupf und verkeilt sich hierdurch.

Für die Rissverteilung, welche bereits durch die Fasern günstig beeinflusst wird, hat der gute Verbund einen positiven Einfluss (geringerer Rissabstand und dadurch kleiner Rissweiten). Für konstruktive Anwendungen bedeutet diese hohe Verbundfestigkeit, dass sehr viel kürzere Verankerungslängen zur Krafteinleitung von der Bewehrung in den Beton notwendig sind. Betonieretappen, Verbindungen von Fertigteilen, Anschlussbewehrung etc. können sehr viel kürzer und einfacher (ohne Hacken) ausgeführt werden. Hierbei sind die grossen konzentrierten Querkraftkräfte aufgrund der kurzen Lasteinleitungslängen zu berücksichtigen.

## ERGEBNISSE

Aus den durchgeführten Versuchen haben sich für den verwendeten UHFB folgende Materialkennwerte ergeben (Tabelle 1):

	Einheit	x	s	Datengrundlage
$f_c$	[MPa]	191	5.9	4 Zylinderdruckversuche
$f_{ct,Matrix}$	[MPa]	8.9	0.06	3 Zugversuche
$f_{ct}$	[MPa]	9.7	0.28	2 Zugversuche
$\varepsilon_c$	[‰]	4.4	0.7	4 Zylinderdruckversuche
$\varepsilon_{ct,Matrix}$	[‰]	0.15	0.03	3 Zugversuche
$\varepsilon_{ct,Lokalisierung}$	[‰]	2.5	0.0	2 Zugversuche
$E$	[GPa]	60	4.1	4 Z. Druck + 3 Zugversuche

Tabelle 1: Materialkennwerte des UHFB

Es zeigt sich, dass der UHFB vereinfacht als ein 2-Stoffgemisch aus einer zementösen Matrix und den in ihr eingelagerten Stahlfasern betrachtet werden kann. Mit den Kennwerten Druck- ( $f_c$ ), Zugfestigkeit ( $f_{ct,matrix}$ ) und E-Modul ( $E$ ) der Matrix und der Verbundfestigkeit ( $f_b$ ), dem Fasergehalt ( $\rho_f$ ), der Faserlänge ( $l_f$ ) und dem Faserdurchmesser ( $\varnothing_f$ ), lässt sich der UHFB charakterisieren. Aus diesen Parametern sollte es mit Hilfe des zu entwickelnden Materialmodells möglich sein, die Spannungs – Dehnungslinie eines beliebigen UHFB zu entwickeln.

Bezüglich der konstruktiven Ausbildung von Bauteilen aus UHFB lässt sich feststellen, dass es nicht effizient ist, die Fasern zur Aufnahme von Zugspannungen aus Last oder Eigengewicht des Tragwerks einzusetzen. Ihre Aufgabe ist vielmehr eine gute Rissverteilung sicherzustellen und den Werkstoff im Bereich von Spannungskonzentrationen im Tragwerk duktiler zu machen. Dies bedeutet, dass Bauteile aus faserverstärktem ultrahochfesten Beton nur mehr eine statische Bewehrung zur Aufnahme der Zugspannungen benötigt. Die Funktion der Minimalbewehrung und evt. auch die der Schubbewehrung und der Umschnürendenbewehrung wird durch die Fasern übernommen.

## 2 ZIELSETZUNG UND KONZEPT

Zielsetzung der Versuchsserie ist es das mechanische Materialverhalten von ultrahochfestem Faserbeton zu untersuchen. Basierend auf den hier gewonnen Erkenntnissen, wird im Rahmen der Forschungsarbeit „unterspannte Träger aus UHFB“ ein Modell zur Beschreibung des Materialverhaltens von UHFB entwickelt.

### 2.1 VERSUCHSERIEN

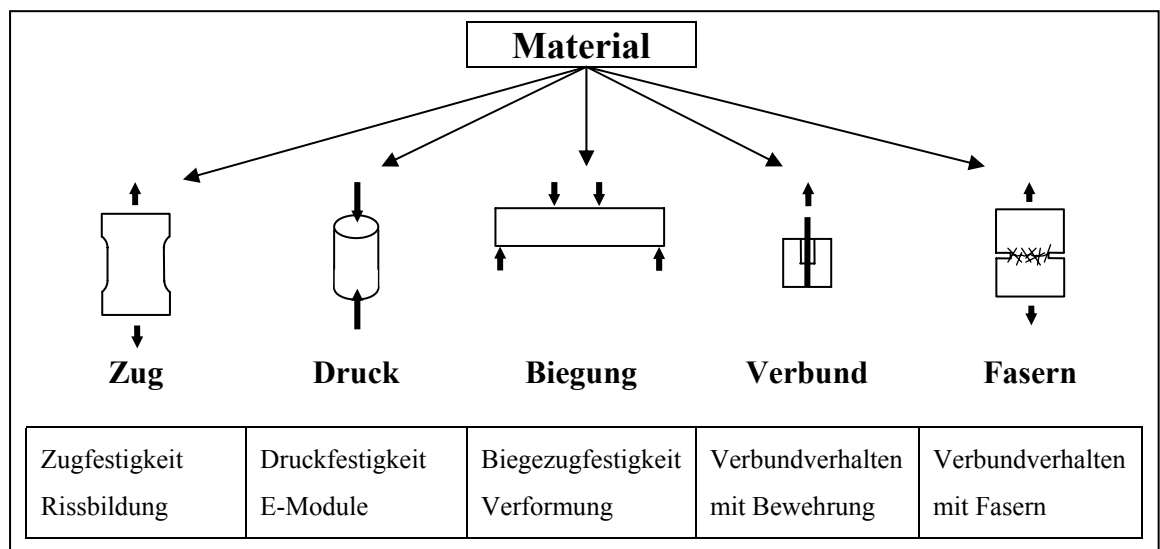
Die Versuche sind in mehrere Versuchsblöcke zusammengefasst. Der hier vorliegende Bericht befasst sich mit dem ersten Block.

In den einzelnen Versuchsblöcken werden folgende Gesichtspunkte behandelt:

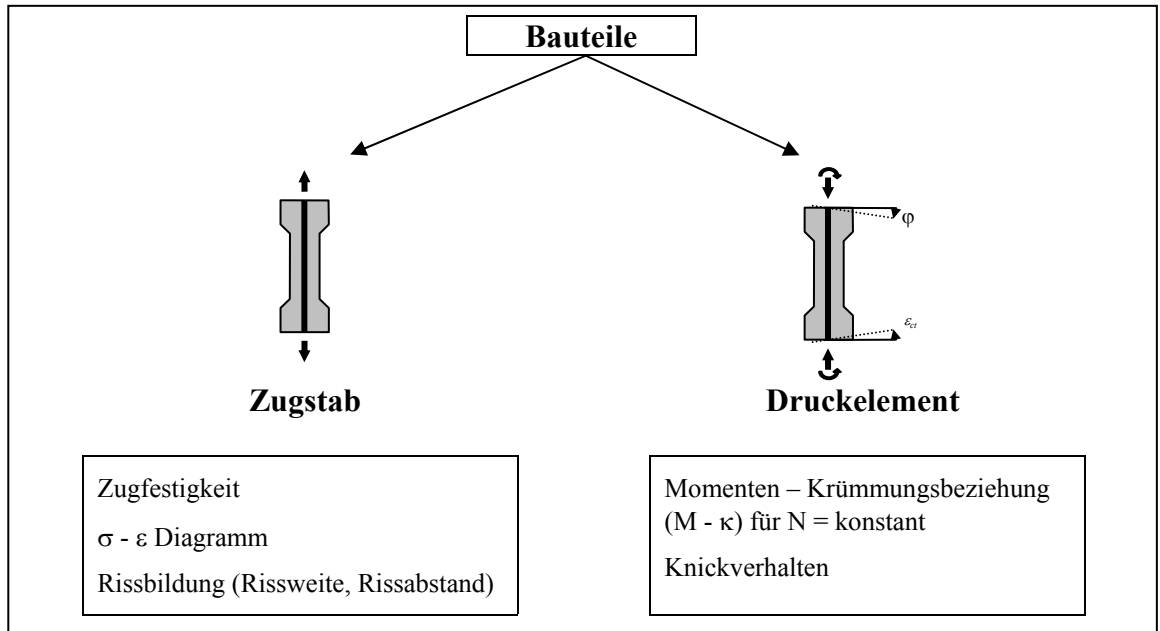
- In einem ersten Versuchsblock wird das Materialverhalten von UHFB untersucht und ergänzende Werkstoffversuche durchgeführt. Ziel ist es, das Materialverhalten zu verstehen, um es folgend modellieren zu können.
- Der zweite Versuchsblock beschäftigt sich mit Bauteilen aus UHFB. Hier werden Druck- und Zugelemente untersucht, welche unbewehrt, mit Stabstahl bewehrt oder vorgespannt ausgeführt sind.
- Weitere Versuche zum Tragverhalten und der konstruktiven Ausbildung von Details von unterspannten Tragwerken sind in Planung.

Folgend sind die einzelnen Versuchsblöcke schematisch dargestellt:

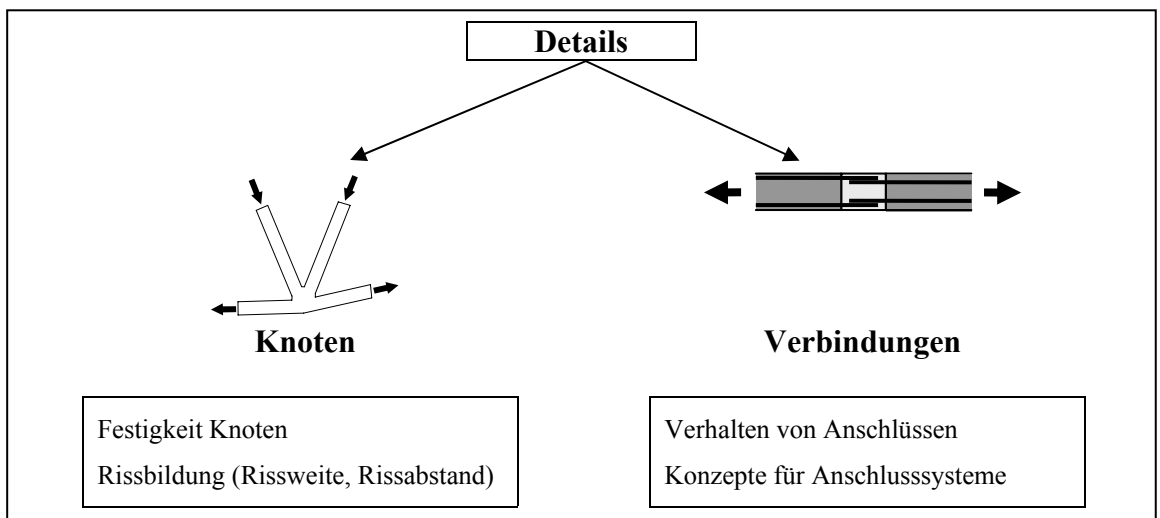
VERSUCHSBLOCK: MATERIAL => VERSUCHSBERICHT TEIL 1



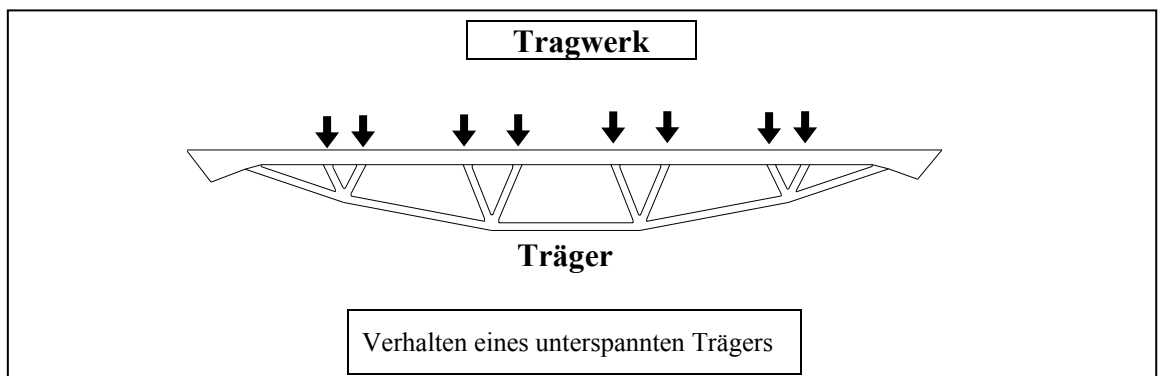
VERSUCHSBLOCK: BAUTEILE => VERSUCHSBERICHT TEIL 2



VERSUCHSBLOCK: DETAILS => (BISHER NUR PROJEKTIDEE !)



VERSUCHSBLOCK: TRAGWERK => (BISHER NUR PROJEKTIDEE !)



## 2.2 VERSUCHSSERIE MATERIAL

Die Werkstoffeigenschaften des UHFB und somit das Tragverhalten der aus ihm gefertigten Bauteile, weichen stark von denen des traditionellen Betons ab. Es sind deshalb grundlegende Studien nötig, um dessen Materialverhalten genauer zu untersuchen.

Um eine geeignete Basis für die Modellierung des Tragverhaltens von Bauteilen aus UHFB zu etablieren, ist es nötig das ermittelte Materialverhalten mit einem vereinfachten Ingenieurmodell zu beschreiben. Dies sollte sich auf wenige, leicht zu ermittelnde Parameter stützen.

Der UHFB lässt sich vereinfacht als ein 2-Stoffgemisch aus einer zementösen Matrix und den in ihr eingelagerten Stahlfasern betrachten. Mit den Kennwerten Druck- ( $f_c$ ) und Zugfestigkeit ( $f_{ct}$ ) der Matrix und der Verbundspannung ( $f_b$ ) dem Fasergehalt ( $\rho_f$ ), der Faserlänge ( $l_f$ ) und dem Faserdurchmesser ( $\varnothing_f$ ), lässt sich ein UHFB charakterisieren. Aus diesen Parametern sollte es mit Hilfe des zu entwickelnden Materialmodells möglich sein die Spannungs – Dehnungslinie eines beliebigen UHFB zu entwickeln.

Zur Ermittlung der hierfür benötigten Parameter werden Zug-, Druck- und Biegeversuche durchgeführt. Ergänzt werden diese durch Ausziehversuche Versuche zur Untersuchung des Verbundes zwischen UHFB und den eingelagerten Stahlfasern bzw. verschiedenen Bewehrungselementen (Bewehrungsstahl und Vorspannkabel). Mit Versuche an Prismen 40 x 40 x 160 mm, welche bei allen Mischchargen durchgeführt werden, wird die gleich bleibende Qualität des Betons überprüft.

In der folgenden Tabelle sind die einzelnen Versuche schematisch zusammengefasst.

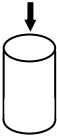
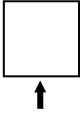
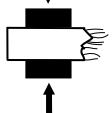

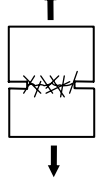
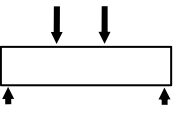
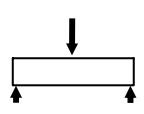
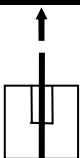
	Schema	Masse	Anzahl	Parameter	Zielsetzung	Kapitel
Druck		Ø70 mm x 140 mm	2 x 4 $\Sigma = 8$	Faserbewehrt / Unbewehrt	Druckfestigkeit $\sigma - \epsilon$ Diagramm E-Modul Einfluss der Fasern	4.1
		100 mm Kantenlänge	18	24 h, 7 d, 28 d	Druckfestigkeit Zeitabhängige Festigkeitsentwicklung Vergleich mit Lieferant	4.2
		40 x 40 x $\approx 80$ mm	je 3 $\Sigma = 66$	Bei allen Mischerchargen	Druckfestigkeit Überprüfung der einzelnen Mischerchargen	4.3
Zug		700 x 160 x 50 mm	4	Faserbewehrt / Unbewehrt	Zugfestigkeit $\sigma - \epsilon$ Diagramm Rissbildung Einfluss der Fasern	5.1
		500 x 200 x 50 mm	3	-	Rissöffnungsverhalten Faserausziehverhalten Verbundverhalten mit Fasern	5.2
Biegung		100 x 100 x 400 mm	3	-	Biegezugfestigkeit M- $\kappa$ Diagramm Rissbildung Relation Zugversuch - Biegeversuch	6.1
		40 x 40 x 160 mm	je 3 $\Sigma = 66$	Bei allen Mischerchargen	Biegezugfestigkeit Überprüfung der einzelnen Mischerchargen	6.2
Verbund		160 mm Kantenlänge	3x3 $\Sigma = 9$	Bewehrung Ø12 mm, Ø20 mm Spannstahl Ø15.7 mm	Verbundverhalten mit Bewehrung Krafteinleitungslänge	7.2

Tabelle 2: Übersicht der Materialversuche



## 3 WERKSTOFF

### 3.1 BETONZUSAMMENSETZUNG

Die Versuchsserie wird mit dem ultrahochfesten Beton BSI®/CERACEM (Spezifizierung BFM – Millau) durchgeführt. Der UHFB wird als fertig konfektionierter Premix von den Firmen SIKA und EIFFAGE geliefert.

Der ultrahochfeste Beton BSI®/CERACEM (Spezifizierung BFM – Millau) ist wie folgt zusammengesetzt (Tabelle 3):

Bestandteile	Einheit	Menge
Premix: Zement CEM 1, Mirkosilica, gebrochener Zuschlag aus gebranntem Bauxit 0 - 7 mm	kg/m <sup>3</sup>	2355
Stahlfasern: $l_f = 20$ mm, $\varnothing = 0.3$ mm, $\rho = 2.5$ vol. %, $f_s > 1250$ MPa	kg/m <sup>3</sup>	195
Fliessmittel: Polycarboxylat, Marke Sikacret	kg/m <sup>3</sup>	44.6
Wasser	kg/m <sup>3</sup>	195

Tabelle 3: Zusammensetzung des ultrahochfesten Beton BSI®/CERACEM

Bei den eingesetzten Stahlfasern handelt es sich um glatte, aus einem hochfesten Stahldraht geschnittene Fasern ohne Endhacken. Der gebrochene Zuschlag aus Bauxit besitzt eine hohe Festigkeit und ein grosses E – Modul. Das Fliessmittel ist ein eigens für den ultrahochfesten Beton optimiertes Produkt der Firma SIKA.

Mit seinen grossen Zuschlägen von bis zu 7 mm und den dicken Stahlfasern weist der CERACEM im Vergleich mit anderen UHFB eine sehr grosskörnige und grobe Struktur auf.

Die 3 Komponenten des Premixes werden unter Zugabe von Wasser entsprechend der Beschreibung im Kapitel 3.2 Probenherstellung zusammengemischt. Der Faseranteil beträgt 2.5 Volumenprozent (Vol.-%). Der Wasser / Zementwert liegt bei 0.22 und der Wasser / Bindemittelwert bei 0.19.

### 3.2 PROBENHERSTELLUNG

Um gleich bleibende Materialeigenschaften zu erhalten, muss eine stricte Mischprozedur befolgt werden. Die einzelnen Bestandteile (Premix, Stahlfaser, Anmachwasser, Fliessmittel) werden vor dem Mischen auf Raumtemperatur gebracht. Sie werden entsprechend des unten aufgeführten Betonrezeptes abgewogen (Tabelle 4).

Für die verschiedenen Herstellungsserien des Premixes ist bis zu  $\pm 10$  l Wasser pro 1 m<sup>3</sup> Beton hinzu zu dosieren, um das angestrebte Ausbreitmass (siehe 3.3 Betonprüfung) genau einzustellen.

Der Mischprozess erfolgt gemäss folgendem Schema in dem leistungsfähigen Gleichlauf - Zwangsmischer mit vertikaler Achse Typ Zyklus ZZ 75. Die Bestandteile werden in der dargestellten Reihenfolge hinzugefügt und jeweils mit der angegebenen Dauer gemischt.

Bestandteil	Mischdauer
Premix	1 min
Wasser	3 min
Fliessmittel	5 min
Stahlfasern	3 min

Tabelle 4: Mischprozess des Premixes

Der UHFB ist selbstverdichtend und wird entsprechend ohne Vibrieren oder anderweitiges Verdichten in die Schalung eingebracht. Zur Nachbehandlung werden die Probekörper direkt nach dem Betonieren mit einer Plastikfolie abgedeckt um das Austrocknen zu verhindern. Nach 3 Tagen werden sie ausgeschalt und anschliessend bis zur Versuchsdurchführung in einem Wasserbecken bei 20 °C gelagert. Die Versuche werden, wenn nicht anders erwähnt, nach 28 Tagen durchgeführt.

### 3.3 BETONPRÜFUNG

Zur Kontrolle gleich bleibender Eigenschaften der einzelnen Mischerchargen, kommt ein Qualitätssicherungssystem zum Einsatz. Für jede einzelne Charge werden die Parameter der Mischung, die Messwerte der Betonprüfung und die hergestellten Proben in ein Formular (Muster siehe Anhang) eingetragen. So ist eine Nachvollziehbarkeit jeder einzelnen hergestellten Mischung und jedes Prüfkörpers möglich.

#### FRISCHBETONPRÜFUNG

Eine erste Kontrolle jeder Charge erfolgt direkt nach dem Mischvorgang am Frischbeton (Übersicht der Prüfungen siehe Tabelle 5).


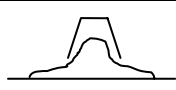
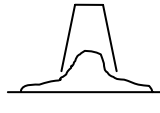
		Schema	Typ	Parameter	Anzahl	Zielsetzung
Frischbetonprüfung	Temperatur		Frischbeton Temperatur Temperaturverlauf	Sollwert max. 5°C über Raumtemp. Hydratationsverlauf.	1 x pro Mischercharge	Beginn der Hydratation während des Mischvorgangs? Hydratationsprozess
	Ausbreitmass		Ausbreitmass DIN - Kegelstumpf	Sollwert Ø 60-65 cm nach 2 min	1 x pro Mischercharge	Konsistenz Segregation
	Slump Flow		Slump Flow Abrams - Kegelstumpf	Sollwert Ø ≥ 65 cm Dauer bis Ø 50 cm	2	Fliessfähigkeit Vergleich mit SCC

Tabelle 5: Übersicht Frischbetonprüfung

#### FRISCHBETONTEMPERATUR / TEMPERATURVERLAUF

Um den bereits während des Mischvorganges beginnenden Hydratationsprozess zu überwachen, wird die Frischbetontemperatur gemessen. Es ist ein Sollwert von  $\leq 5^\circ \text{C}$  über Raumtemperatur einzuhalten. Wird er überschritten, ist der Mischvorgang mit einer zu hohen Energie durchgeführt worden und die chemische Reaktion wurde zu stark angeregt. Es muss entsprechend mit einer niedrigeren Energie gemischt werden.

Weiterhin wird bei einigen Chargen der Temperaturverlauf des jungen Betons aufgezeichnet (0 – 2 Tage). Hieraus kann man Rückschlüsse auf den Reaktionsverlauf der Hydratation des Betons ziehen. Ein Thermoelement wird hierzu in einen Betonwürfel mit 100 mm Kantenlänge einbetoniert. Die verwendete Holzschalung wird hierbei nicht weiter thermisch isoliert, um vergleichbare Bedingungen mit den anderen Probekörpern zu gewährleisten. Mit einem Datenlogger wird die Temperatur im Minutentakt aufgezeichnet.

## ERGEBNISSE

Alle Bestandteile der Betonmischung hatten zu Beginn des Mischvorganges Raumtemperatur. Die Temperatur im Laboratorium lag im Bereich 18 bis 22 Grad Celsius für die Chargen 12 bis 16 und für die weiteren Chargen zwischen 25 und 30 Grad. Durch die Reibung während des Mischvorganges erhöht sich die Temperatur um bis zu 5 Grad. In folgender Tabelle sind die gemessenen Frischbetontemperaturen der einzelnen Chargen aufgeführt.

Charge NR	12	13a	13b	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Temperatur	26°	25°	26°	25°	24°	20°	31°	31°	30°	31°	29°	33°	34°	32°	30°	34°	35°	36°	34°	33°	34°
Raumtemperatur	18° - 22°						25° - 30°														

Tabelle 6: Frischbetontemperatur

Bei keiner der Chargen wurde ein Überschreiten des 5°C Kriteriums festgestellt. Die Energie des Mischprozesses kann somit als korrekt betrachtet werden. Betrachtungen zum Einfluss der unterschiedlichen Raumtemperaturen werden im Abschnitt 4.3 Stempeldruckversuche durchgeführt.

Der Temperaturverlauf beim Abbinden der Mischung 13a, 14 und 15 ist in Bild 3 dargestellt: Der Frischbeton wird durch den Mischvorgang auf bis zu 25°C erwärmt. Die Temperatur pendelt sich innerhalb von wenigen Stunden auf die Umgebungstemperatur (hier 20°C) ein. Folgend bleibt sie für einige Stunden konstant, bis nach 20 h die Temperatur rasch ansteigt. Das Maximum von 45°C wird nach rund 24 h erreicht. Die Proben kühlen innerhalb von rund 24 h wieder auf Raumtemperatur ab.

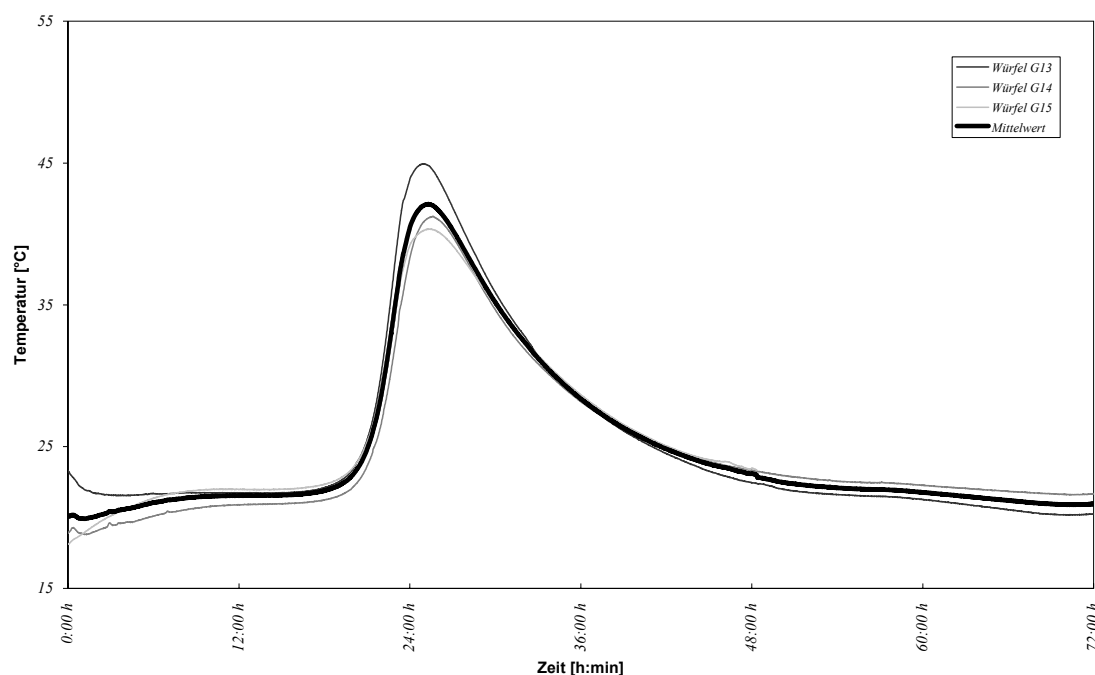


Bild 3: Verlauf der Frischbetontemperatur

Der durch den markanten Temperaturanstieg gekennzeichnete späte Reaktionsbeginn des Betons, ist wahrscheinlich auf den hohen Fließmittelgehalt zurückzuführen, welcher einen verzögernden Effekt auf den Frischbeton hat. Dass es zu solch einem schnellen und starken Anstieg der Probentemperatur kommt, lässt sich durch den hohen Zementgehalt und dessen feine Mahlung erklären. Durch die Holzschalung ist der Probekörper relativ gut isoliert, sodass es nur zu einem langsamen Abkühlen kommt.

Bei der Konzeption von Bauteilen aus UHFB ist diese starke Erhitzung und die daraus folgende Ausdehnung und das anschliessende Schwinden zu berücksichtigen (Zwangsspannungen). Auch könnte durch spezielle Betonzusatzmittel (Verzögerer) eine langsamere und geringere Erwärmung erzielt werden.

Dass die Temperaturspitze nach 24 h auftritt, erklärt die grosse Varianz welche bei der Festigkeitsprüfung nach 24 h festgestellt wurde (siehe 4.2 Würfeldruckversuche). Geringe Abweichungen (Prüfzeitpunkt, Umgebungstemperatur, Dosierung) können hier einen grossen Einfluss auf die bereits erreichte Festigkeit haben. Eine Messung der Festigkeit nach 24 h, was als Prüfkriterium für die Betonfestigkeit zunächst vorgesehen war, ist deshalb als nicht sinnvoll anzusehen.

#### AUSBREITMASS / SEGREGATION

Es werden zwei verschiedene Prüfverfahren zur Ermittlung des Ausbreitmasses benutzt. Ein „modifiziertes“ klassisches Ausbreitmass mit dem DIN – Konus und der Slump-Flow mit dem Abrams – Konus (siehe Bild 4).



*Bild 4: Ausbreittisch mit dem Abrams - Konus für den Slup Flow (links) und dem DIN - Konus für das modifizierte Ausbreitmass (rechts)*

Mit einem modifizierten Ausbreitmass wird die Konsistenz jeder einzelnen Mischung überprüft. Dieses Prüfverfahren wird in der gleichen Weise auch vom Lieferanten des Premixes benutzt, womit ein direkter Vergleich mit dessen Erfahrungswerten möglich ist. Der Versuch wird gemäss der Norm (SN EN 262/1 [11]) mit dem DIN-Kegelstumpf durchgeführt, ohne aber den Beton zu verdichten und den Ausbreittisch fallen zu lassen. Der Durchmesser wird nach 2 min ermittelt. Das Sollmass liegt bei 60 – 65 cm. Dieses Mass ist durch Variieren des Anmachwassers ( $\pm 10$  Liter pro  $1 \text{ m}^3$ ) einzustellen.

Um einen Vergleich mit der Konsistenz und Fließfähigkeit von selbstverdichtendem Betonen herstellen zu können, wird der dort verwendete ‚Slump Flow‘ gemessen. Anstelle des DIN-Kegelstumpfs wird der Kegelstumpf nach Abrams verwendet. Er besitzt ein rund dreimal grösseres Volumen. Es wird die Zeit ermittelt bis ein Durchmesser von 50 cm erreicht ist. Man erhält hierdurch eine Aussage über die

Viskosität des Frischbetons. Der maximale Durchmesser  $\varnothing_{t_{\infty}}$  für selbstverdichtende Betone soll bei  $\geq 65$  cm liegen. Zusätzlich sind die Homogenität und eine eventuelle Segregation zu beurteilen.

## ERGEBNISSE

In folgender Tabelle sind die Prüfergebnisse des „modifizierten“ Ausbreitmasses (DIN - Konus) aller Mischerchargen aufgeführt.

Charge NR	12	13a	13b	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Ausbreitmass	63	62	65	64	73	79	59	68	64	65	66	70	68	65	67	67	56	56	70	65	57

Tabelle 7: Ausbreitmass des Frischbetons

Die Charge 16 beinhaltet keine Fasern, weshalb ein weit grösseres Ausbreitmass erzielt wird. Bei Charge 15 wurde das Ausbreitmass fälschlicherweise mit einem zu nassen Ausbreittisch durchgeführt. Eine sehr hohe Steifigkeit des Materials wurde bei den Chargen 27 und 28 festgestellt. Diese erklärt sich eventuell damit, da diese Chargen bei den höchsten Raumtemperaturen durchgeführt wurden. Da die Stempeldruckfestigkeiten dieser Prüfkörper (siehe 4.3 Stempeldruckversuche) im oberen Festigkeitsbereich liegen, wird davon ausgegangen, dass hieraus keine negativen Auswirkungen auf die Probekörper zu erwarten sind.

Für die Prüfmethode des Slump Flows ergeben sich für die Chargen 12 und 15 folgende Werte:

Charge NR	$t_{\varnothing 50}$ [sec]	$\varnothing$ max [cm]
12	20	70
15	13	67

Tabelle 8: Slump-Flow

Aus nur zwei Messungen kann keine genaue Korrelation zwischen den verschiedenen Messmethoden abgeleitet werden. Doch wird deutlich, dass bei den beiden Prüfverfahren unterschiedliche Ausbreitmasse erzielt werden. Der Durchmesser des Slump-Flows ist hierbei tendenziell grösser. Für einen Vergleich von Prüfergebnissen ist es entsprechend wichtig genau zu definieren welchen Typ des Ausbreitmasses (DIN- oder Abrams - Konus) durchgeführt wird.

Vergleicht man die Prüfergebnisse des ultrahochfesten Betons mit typischen Kennwerten von Selbstverdichten Betonen, liegt man im Bereich der auch dort vorzufindenden Konsistenzen und Viskositäten.

Bei der optischen Beurteilung des Ausbreitkuchens wurde bei keiner der Mischchargen eine Segregation des Betons oder eine Nesterbildung der Fasern festgestellt.

## FESTBETONPRÜFUNG

Am ausgehärteten Beton wird nach 28 Tagen die Festbetonprüfung der einzelnen Mischerchargen durchgeführt. Die hierfür durchgeführten Versuche werden in den Kapiteln der Materialversuche beschrieben. Folgend wird die Methodik vorgestellt und für die Versuchsdurchführung und die Ergebnisse auf die jeweiligen Kapitel verwiesen.

Tabelle 9 zeigt eine Übersicht der durchgeführten Prüfungen.

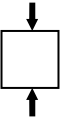
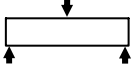
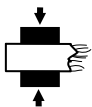
		Schema	Typ	Parameter	Anzahl	Zielsetzung
Festbeton	Würfel		Druckwürfel 100 mm Kantenlänge	Würfeldruck- festigkeit	2 x 3 Proben	Kalibrierung mit den Prüfwerten des Lieferanten
	Prisma		Prisma 40 x 40 x 160 mm	3 Punkt Biegung	3 / Mischer- charge	Überprüfung der einzelnen Mischerchargen bezüglich  Biegezug- und Druckfestigkeit
			Gebrochenes Prisma 40 x 40 x ≈80 mm	Stempeldruck- festigkeit		

Tabelle 9: Übersicht Festbetonprüfung

Um die Konformität des hergestellten Festbetons mit denen des Premix Lieferanten zu überprüfen, werden für beide Labors einheitliche Druckwürfel mit 100 mm Kantenlänge für die Prüfung verwendet. Nachdem sichergestellt wurde, dass die Würfeldruckfestigkeit mit denen im Labor des Lieferanten erzielten Prüfwerten übereinstimmt, werden zur Qualitätssicherung der folgenden Mischerchargen Prismen vom Typ „Mörtelprobe“ auf Biegung und Druck belastet. Dieser Wechsel des Überwachungsverfahrens erscheint sinnvoll, da im Gegensatz zum Druckwürfel bei den Prismen sowohl die Zug- (über Biegezug) als auch die Druckfestigkeit überprüft werden kann.

Ergänzend wurde an den Würfeldruck-Probekörpern auch die Dichte ( $\rho$ ) des Werkstoffes bestimmt. Durch Wägung über und unter Wasser ergibt sich eine Dichte von  $2.83 \text{ t/m}^3$ .

## WÜRFEL

Es werden Druckversuche an Würfel mit einer Kantenlänge von 100 mm durchgeführt (Kapitel 4.2 Würfeldruckversuche).

Die Versuche werden an zwei verschiedenen Mischerchargen durchgeführt. Es ergibt sich eine mittlere Würfeldruckfestigkeit von  $f_{c,cube}$  von 202 MPa bei einer nur sehr geringen Streuung der einzelnen Messwerte (siehe Tabelle 10). Die Festigkeit ist somit konform mit den erzielten Festigkeiten des Lieferanten.

Charge	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert	Standartabweichung
12	200.5	211.4	207.4	206	5.51
13a	204.7	188.8	197.2	197	7.95
Durchschnitt				202	8.05

Tabelle 10: Würfeldruckversuche nach 28 Tagen (Festigkeit in MPa)

## PRISMEN

Die Prismen Typ „Mörtelprobe“ (40 x 40 x 160 mm) werden zunächst in einem 3 - Punkt Biegeversuch bis zum Bruch belastet (Prüfverfahren nach SN EN 266 [13]) (Kapitel 6.2 Drei – Punkt Biegeversuch). Man erhält zwei Bruchhälften, von denen eine erneut als Druckprobe mit einem Stempel 40 x 40 mm belastet wird (Kapitel 4.3 Stempeldruckversuche). Von jeder Mischercharge werden hierfür 3 Prismen hergestellt und getestet.

Tabelle 11 und Tabelle 12 zeigen die Ergebnisse der Festbetonprüfung.

Charge NR	13a	13b	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Gesamt
Probe 1	31.5	43.2	32.7	-	26.6	44.4	35.4	39.3	34.3	30.7	37.1	38.2	35.6	41.6	46.1	38.9	51	36	47.9	43.5	
Probe 2	34.5	43.5	34.8	45.7	22.9	36.1	42.9	32.8	32.3	38	41.7	46	44.7	43.5	51.6	52.2	39.6	38.1	57	41.8	
Probe 3	35.2	37.9	30.4	35.8	27.7	43.3	-	38.3	42.2	43.2	52.8	40.9	42.8	46.7	35.4	36.6	49.1	47.8	57.5	50.9	
$\bar{x}$	33.7	41.5	32.6	40.7	25.7	41.3	39.2	36.8	36.3	37.3	43.9	41.7	41.0	43.9	44.4	42.6	46.5	40.6	54.1	45.4	41
s	1.95	3.18	2.17	6.99	2.55	4.51	5.33	3.49	5.24	6.26	8.04	3.97	4.82	2.59	8.27	8.41	6.11	6.32	5.40	4.82	6.62

Tabelle 11: Drei-Punkt Biegeversuch (Messwerte in MPa)

Charge NR	13a	13b	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Gesamt
Probe 1	217	233	234	256	196	243	222	235	226	256	267	218	264	261	258	257	246	254	266	265	
Probe 2	231	245	238	241	184	252	244	236	244	251	221	262	262	269	258	261	258	252	270	255	
Probe 3	223	244	234	242	189	247	214	234	254	233	253	209	265	239	254	241	256	252	248	247	
$\bar{x}$	224	241	235	246	190	247	227	235	242	247	247	230	264	256	257	253	254	252	261	256	246
s	6.9	6.5	2.4	8.1	5.6	4.4	15.3	1.0	14.3	11.9	23.3	28.4	1.7	15.2	2.3	10.6	6.4	1.3	11.7	9.2	15.1

Tabelle 12: Stempeldruckfestigkeit (Messwerte in MPa)

Wie in der detaillierte Untersuchung der Resultate (siehe jeweilige Kapitel) dargestellt ist, führt die kleine Probengrösse und die zweimalige Nutzung der Probe (Biegung und Druck) zu einer grösseren Streuung der Resultate. Für zukünftige Versuchsserien sind einerseits grösser Versuchskörper vorzusehen (Homogenität bei 3 Punkt Biegung) und andererseits ist eine Trennung der Probekörper für Zug und Druckversuchen anzustreben (Vorschädigung der Probe). Vorgeschlagen werden Proben für den 3-Punkt Biegeversuch von 70 x 70 x 280 mm und Zylinder Ø 110 mm, h = 220 mm für den Druckversuch.

### Zusammenfassung der Ergebnisse der Betonprüfung

Für die durchgeführten Material- und Bauteilversuche kann aufgrund der Ergebnisse der Betonprüfung davon ausgegangen werden, dass bei allen Mischerchargen ein Beton mit gleichen Eigenschaften hergestellt wurde. Die vorhandenen geringfügigen Abweichungen sind dem Prüfverfahren zuzuschreiben (siehe oben). Sollten sich bei den Versuchsergebnissen unerwartete Abweichungen festgestellt werden sind genauere Betrachtungen anzustellen. Dies insbesondere bei den Mischercharge bei denen grösseren Abweichungen festgestellt wurden: 13a, 18 und 23 bezüglich Stempeldruckfestigkeit und 27 & 28 beim Ausbreitmass bzw. der hohen Raumtemperatur.

Eine tabellarische Übersicht aller Messwerte der Betonprüfung und der hergestellten Probekörper ist im Anhang beigefügt.

## 4 DRUCKVERSUCHE

### 4.1 ZYLINDERDRUCKVERSUCH

Es werden Druckversuche an zylindrischen Probekörpern durchgeführt. Diese Form wurde gewählt um Spannungsverhältnisse zu erhalten, wie sie auch im Druckbereich eines Tragwerkes auftreten. Im Gegensatz zu Würfelpuben, bei denen sich durch die Reibung an der Oberfläche der Prüfplatten ein grosser Einfluss auf die Druckfestigkeit ergibt, sind die Spannungen im Druckzylinder weitgehend mit den Spannungszuständen innerhalb eines Tragwerkes vergleichbar.

Um den Einfluss der Fasern auf das Drucktragverhalten beurteilen zu können, werden neben den bewehrten Zylindern auch unbewehrte Proben belastet. Hierbei werden insbesondere der Einfluss auf die Duktilität und der Beitrag der Fasern zur Druckfestigkeit untersucht.

#### PROBEKÖRPER

Pro Serie (bewehrt, unbewehrt) werden jeweils 4 Proben getestet. Die Probekörper haben eine Höhe von 140 mm bei 70 mm Durchmesser. Die Stirnflächen der Proben werden plan geschliffen, wodurch sich die Höhe um 2 bis 4 mm verringert.

#### VERSUCHSAUFBAU UND MESSEINRICHTUNG

Die Proben werden zwischen 2 Prüfplatten abgedrückt. Eine der Platten ist hierbei gelenkig gelagert um Imperfektionen auszugleichen. Die Verformungen werden einerseits durch 2 induktive Wegaufnehmer zwischen den Prüfplatten und andererseits 2 Dehnmessstreifen (DMS  $l = 18$  mm) auf der Oberfläche der Probe aufgenommen. Diese zwei redundanten Messsysteme werden eingesetzt, um den Einfluss aus Messplattenverformung und Effekten in der Übergangsfläche durch Messungen direkt am Prüfkörper auszuschliessen und um andererseits nach Erreichen der Bruchlast noch Messungen durchführen zu können (siehe Bild 5 und Bild 6). Die Probleme, welche sich bezüglich der Messungen mit DMS bei normalem Beton aufgrund der grossen Zuschläge ergeben, stellen sich bei dem sehr homogenen UHFB nicht.

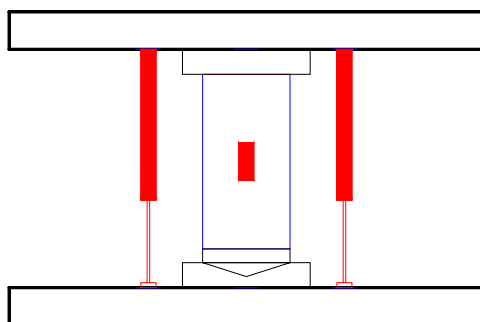
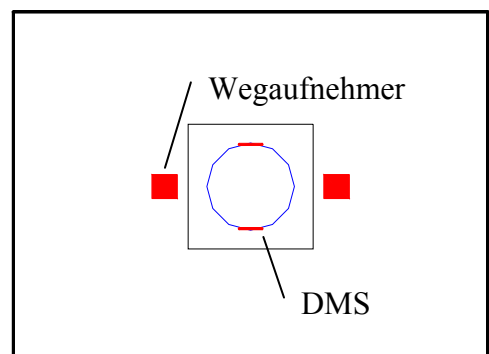
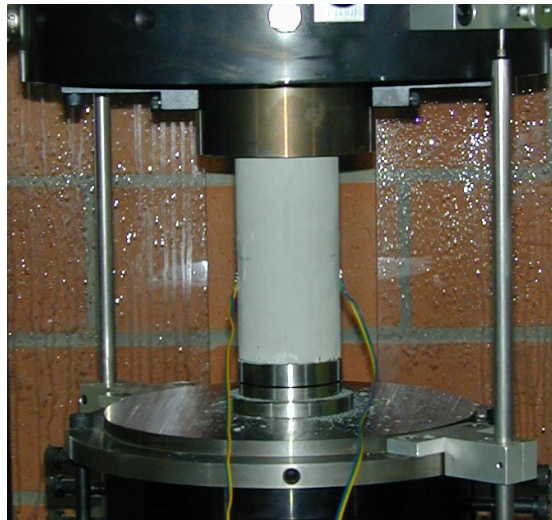


Bild 5: Schema Versuchsaufbau







*Bild 6: Foto des Versuchsaufbaus*

#### VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die Proben werden mit Hilfe einer kleinen Vorlast in der Maschine zentriert (Ausrichten des Ausgleichslagers). Die Belastung erfolgt weggesteuert mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von 0.18 mm/min. Um das Nachbruchverhalten untersuchen zu können, wird die Probe nach Erreichen der Festigkeit weiter verformt.

Die Verformung und die Kraft der maschineninternen Kraftmessdose werden kontinuierlich aufgezeichnet.

#### ERGEBNISSE

Am Bruchbild der Zylinder zeigt sich der Bruchmechanismus von Druckelementen aus UHFB (siehe Bild 7). Deutlich sind Längsrisse im mittleren Bereich der Probe zu erkennen. Die Proben versagen ohne Vorankündigung durch Abscheren entlang einer diagonalen Gleitebene. Nach dem Bruch hält die Probe durch die beim Bruch weitgehend intakt bleibenden Fasern kompakt zusammen. Es bilden sich einzelnen Schollen aus, welche untereinander durch die Fasern verbunden sind. Von ihnen kann weiterhin eine gewisse Druckkraft aufgenommen werden.



*Bild 7: Geprüfter Druckzylinder mit diagonalen Bruchfuge*

Bild 8 zeigt das Spannungs-Dehnungsdiagramm der Druckversuche. Die Kurven dieses Diagramms sind aus den Messergebnissen der DMS (ansteigender Ast) und der induktiven Wegaufnahme (absteigender Ast) zusammengesetzt. Wie in den Auswertungen der einzelnen Proben (siehe Anhang) erkenntlich ist, ist als Korrektur

für die induktiven Wegaufnehmer eine Verschiebung der Kurve (Zusammendrücken der Grenzschichten) und eine Änderung der Steigung (elastische Maschinenverformung) nötig.

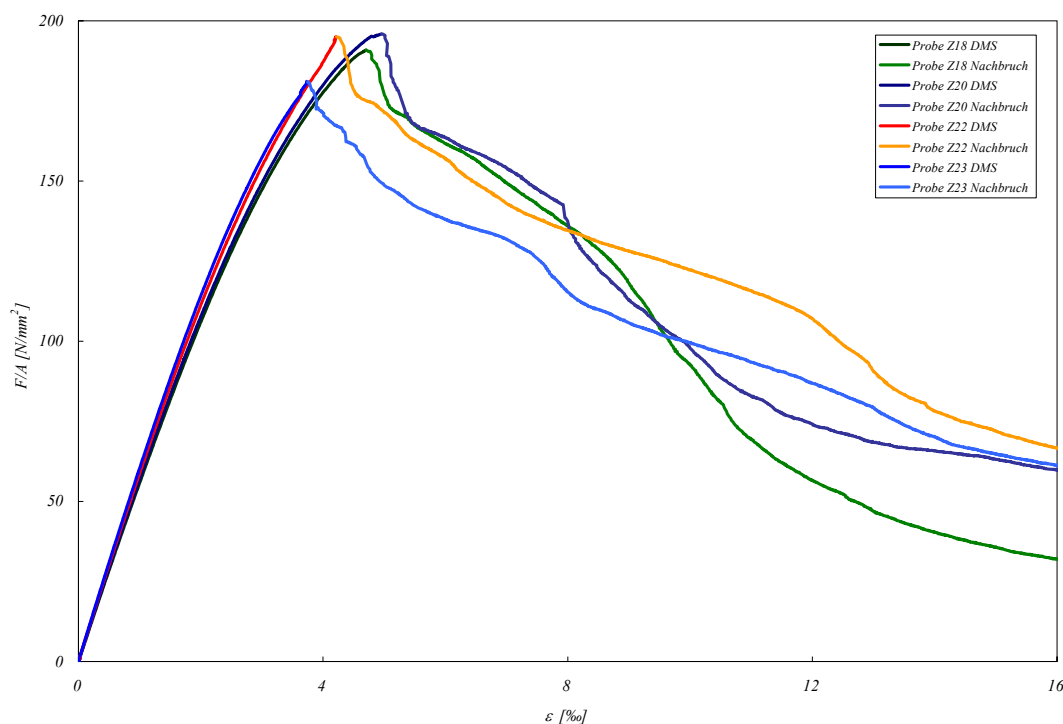


Bild 8: Spannungs – Dehnungsdiagramm der faserbewehrten Druckzylinder

Das Spannungs-Dehnungsdiagramm zeigt im ungerissenen Zustand ein quasi lineares Verhalten. Kurz vor dem Bruch kommt es zu einer leichten Abnahme der Steifigkeit. Der Druckzylinder versagt schlagartig, wobei es zu einem sprunghaftem Festigkeitsverlust von rund 20 MPa (ca. 10%) kommt. Anschliessend zeigen die Proben eine grosse Restfestigkeit mit einer fortschreitenden Entfestigung. Bei einer Stauchung von rund 10‰ weisen die Proben noch eine Restfestigkeit von rund 100 MPa und somit rund 50% der Druckfestigkeit  $f_c$  auf.

Die Ergebnisse der 4 Druckversuche sind in Tabelle 13 zusammengefasst. Die Proben weisen eine mittlere Festigkeit von 191 MPa auf. Die Bruchdehnung beläuft sich hierbei auf rund 4.4‰. Bei den Versuchen liegen 3 Proben sehr nah beieinander, die vierte Probe (Z23) weist eine grössere Abweichung auf.

Der angegebene E-Modul wird als Sekantenmodul zwischen  $F = 0$  und  $F = 1/3 F_{ult}$  aus den Messungen der DMS ermittelt.

		Z18	Z20	Z22	Z23	Mittel	s
<b>Druckfestigkeit (<math>f_c</math>)</b>	[MPa]	190.9	195.9	195.0	181.1	<b>191</b>	5.9
<b>Bruchdehnung</b>	[‰]	4.7	5.0	4.2	3.7	<b>4.4</b>	0.7
<b>E - Modul</b>	[GPa]	55.5	56.1	58.4	60.3	<b>58</b>	2.7

Tabelle 13: Übersicht der Ergebnisse der faserbewehrten Zylinderdruckversuche

#### VERGLEICH MIT UNBEWEHRTEN PROBEN

Zum Vergleich werden auch unbewehrte Probekörper aus ultrahochfestem Beton getestet. Es lässt sich hiermit die Wirkungsweise der Fasern in druckbelasteten Elementen analysieren.



Bild 9: Bruchbild der unbewehrten Probe

Das Bruchbild zeigt ein von den bewehrten Proben abweichendes Bruchverhalten. Die Probe versagt explosionsartig. Es bildet sich eine sanduhrförmige Bruchfigur aus. Das Bruchbild ist somit vergleichbar mit den Bruchbild von Normalbeton.

Betrachtet man die Spannungs-Dehnungskurve, so ist bis zum Versagen kein wesentlicher Unterschied zwischen den unbewehrten Proben (Z24 – Z27) und der bewehrten Referenzprobe (Z20) zu erkennen (siehe Bild 10). Die Druckfestigkeit liegt minimal niedriger. Nach dem Versagen kann von dem unbewehrten Probekörper keinerlei Kraft mehr aufgenommen werden. Es zeigt sich ein extrem sprödes Bruchverhalten.

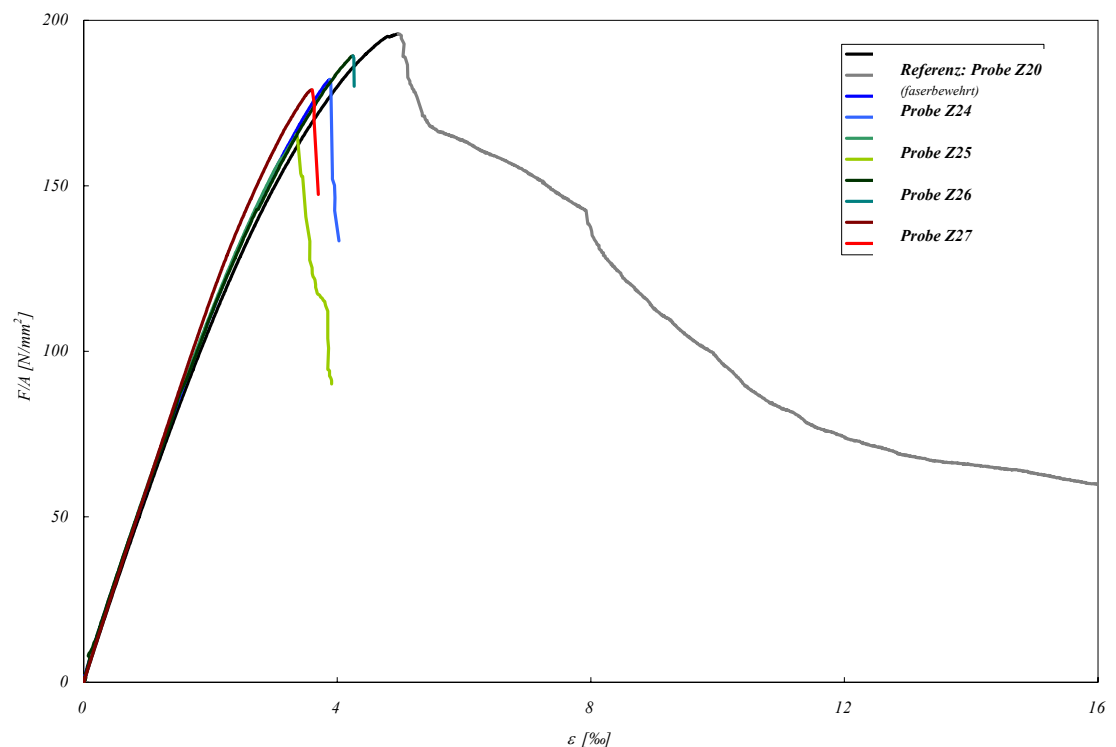


Bild 10: Spannungs – Dehnungsdiagramm der unbewehrten Druckzylinder mit Vergleichsprobe Z20 (faserbewehrt)

Die mittlere Festigkeit der unbewehrten Probe liegt im Vergleich zum Mittel der bewehrten Proben um rund 5% niedriger. Entsprechend ist die Bruchdehnung auf einen Mittelwert von 3.7‰ reduziert. Der E-Modul kann als annähernd gleich bleibend bezeichnet werden.

		Z24	Z25	Z26	Z27	Mittel	s	Vergleich
								Mittel mit Fasern
<b>Druckfestigkeit (<math>f_c</math>)</b>	[MPa]	182.2	165.5	189.3	179.0	<b>179</b>	8.6	190.7
<b>Bruchdehnung</b>	[‰]	3.9	3.4	4.3	3.6	<b>3.8</b>	0.5	4.4
<b>E - Modul</b>	[GPa]	58.9	59.3	58.0	59.0	<b>59</b>	0.7	57.6

Tabelle 14: Übersicht und Vergleich der Ergebnisse der unbewehrten Zylinderdruckversuche

Man kann zusammenfassend feststellen, dass die Faserbewehrung keinen Einfluss auf den E-Modul hat. Die Festigkeit wird aber durch die Fasern erhöht. Die Fasern haben eine umschnürnde Wirkung (Mikrobewehrung) womit die Querdehnung behindert wird und sich ein 3-achsiger Spannungszustand ausbildet. Nach dem Bruch ergibt sich durch die Fasern eine hohe Resttragfähigkeit.

Der Verlauf der Spannungs – Dehnungskurve der hier betrachteten Druckprobe aus UHFB kann wie folgt abstrahiert werden (Bild 11):

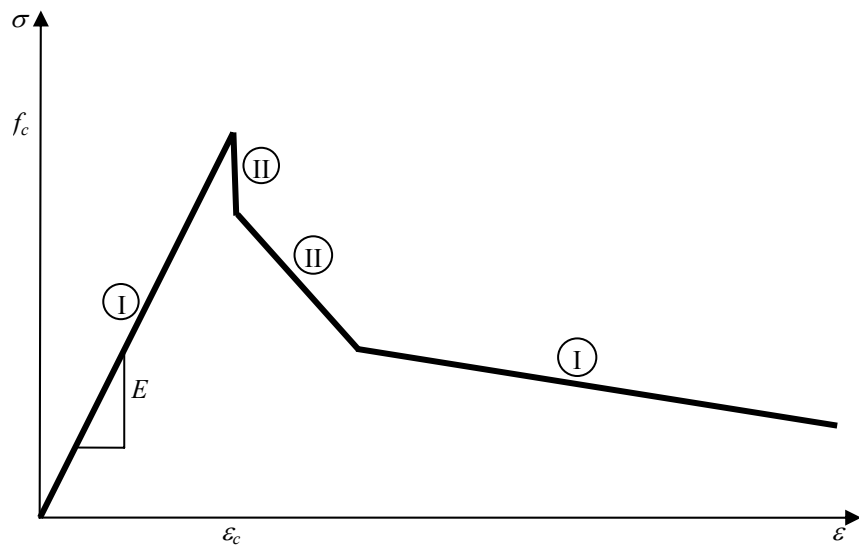


Bild 11: Schematische Spannungsdehnungslinie des Druckverhaltens des getesteten UHFB

Phase I: Linear - elastische Verformung - Zementmatrix ungerissen

Phase II: Schlagartige Rissbildung – Spaltrisse; Ausbildung von einzelnen Betonschuppen die untereinander noch mit Fasern verbunden sind – Faser fangen das Ineinanderschieben der Schollen ab

Phase III: Langsames Zerstören der Faserbrücken durch Abscheren, Ausreissen und Abplatzen der Zementmatrix an den Fasermündungen.

Phase IV: Zermalmern des restlichen Betons

## 4.2 WÜRFELDRUCKVERSUCHE

Zum Vergleich mit den Zylinderdruckversuchen werden Würfel mit einer Kantenlänge von 100 mm bis zum Erreichen ihrer Druckfestigkeit belastet. Die Versuche werden nach 28 Tagen durchgeführt. Zusätzlich werden Versuche nach 24 Stunden und 7 Tagen durchgeführt um die zeitliche Festigkeitsentwicklung zu untersuchen.

Diese Versuchsserie dient auch zum Vergleich mit der Referenzfestigkeit des Materiallieferanten.

### VERSUCHSAUFBAU UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die Proben werden auf den seitlichen (gegen die Schalung liegenden) nicht plangeschliffenen Flächen belastet. Die Prüfeinrichtung besteht aus 2 ebenen

Stahlplatten, wobei eine der Platten zum Ausgleich von Imperfektionen gelenkig gelagert ist. Die Belastungsgeschwindigkeit liegt bei 12.5 KN/sec. Die Kraft wird mit der maschineninternen Kraftmessdose gemessen.

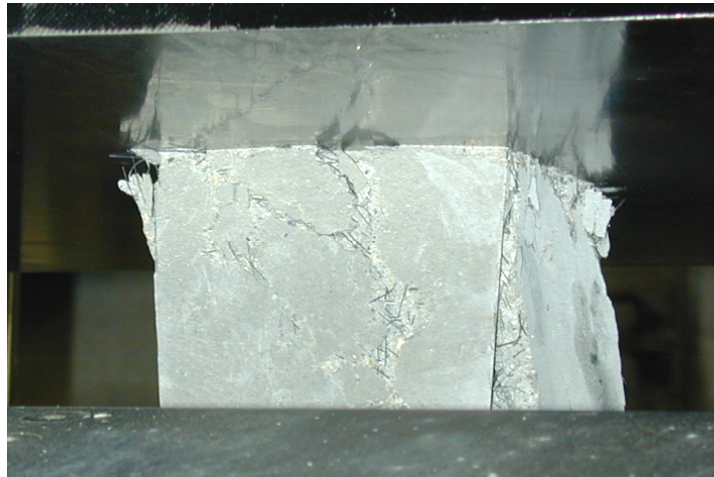


Bild 12: Würfel zwischen den Druckplatten der Prüfmaschine

## ERGEBNISSE

In der folgenden Tabelle sind die Messergebnisse der Würfeldruckversuche aufgeführt.

Charge	24h				7d				28d			
	Probe 1	Probe 2	Probe 3	$\bar{x}$	Probe 1	Probe 2	Probe 3	$\bar{x}$	Probe 1	Probe 2	Probe 3	$\bar{x}$
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
<b>9</b>	101	113		107	156	163		160				
<b>12</b>	6	8		7					201	211	207	206
<b>13a</b>	65	70	69	68	170	172	172	171	205	189	197	197
<b><math>\bar{x}</math></b>				<b>61</b>				<b>166</b>				<b>202</b>
<b>s</b>				-				6				5

Tabelle 15: gemessene Würfeldruckfestigkeit  $f_{c,cube}$  zu unterschiedlichen Prüfzeitpunkten

Es wurden Probekörper aus 3 unterschiedlichen Mischerchargen (9, 12 und 13a) getestet. Die mittleren Festigkeiten der Druckwürfel betragen 61 MPa bei 24 h, 166 MPa bei 7 Tagen und 202 MPa bei 28 Tagen Prüfzeitpunkt.

## ZEITLICHE ENTWICKLUNG DER FESTIGKEIT

Bild 13 zeigt die zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit. Es sind jeweils die Messergebnisse, der Mittelwert der Altersgruppe und die Streubreite der Messergebnisse eingetragen. Zum Vergleich ist die Kurve der Festigkeitsentwicklung von Normalbeton bei 20°C nach CEB Model Code [2] aufgetragen (gestrichelte Linie).

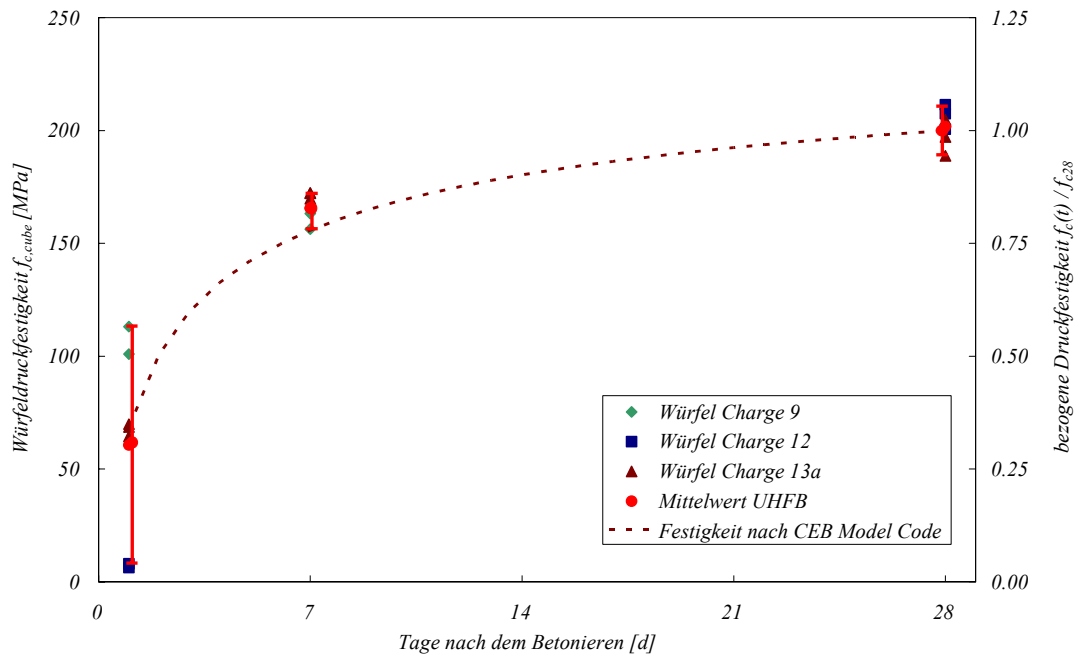


Bild 13: Festigkeitsentwicklung der Würfeldruckfestigkeit zu den konkreten Zeitpunkten 24 h, 7 d & 28 d

Deutlich zu erkennen ist die, im Vergleich zu Normalbeton höhere Frühfestigkeit (Kurve nach CEB Model Code [2]). Es werden bereits nach 7 Tagen 89% der 28 Tagefestigkeit erreicht. Entsprechend ist anzunehmen, dass die Nacherhärtung des Materials geringer ausfällt als bei Normalbeton. Dieses Verhalten lässt sich durch die hohe Mahlfineinheit und der sich daraus ergebenden grossen Reaktionsoberfläche der reaktiven Bestandteile des UHFB Premixes erklären. Es kommt zu einer schnelleren Reaktion und somit auch einem früheren Abklingen der Nacherhärtung. Die in Abschnitt 3.3 Betonprüfung dargestellte Kurve des Temperatur Verlaufes beim Abbinden, zeigt nach 24 h eine Temperaturspitze von bis zu 45°C. Diese starke Erwärmung führt zu einer weiteren Beschleunigung des Abbindeprozesses. Auch die Norm SN EN 262 [12] gibt zu höheren Abbinde Temperaturen und schnell reagierenden Zementen Hinweise, aus denen ein schnelles Erreichen der Endfestigkeit hervorgeht.

Bezüglich der einzelnen Messwerte fällt die grosse Varianz der 24 h - Probekörper auf. Die Proben der einzelnen Chargen weisen zwar intern nicht allzu grosse Abweichungen auf, doch weichen die Messwerte der verschiedenen Chargen stark von einander ab. Aus dem Temperaturverlauf beim Abbinden (siehe 3.3 Betonprüfung) liegt die Temperaturspitze und somit der Höhepunkt der Reaktionsaktivität im Bereich von 24 h. Führt man nun Versuche genau zu diesem Zeitpunkt durch, so können bereits kleine Variationen einzelner Parameter (Umgebungstemperatur, Temperatur einzelner Betonbestandteile, Abweichung vom Prüfzeitpunkt 24 h, Ungenauigkeit der Dosierung) zu grossen Abweichungen der 24 h Festigkeit führen. Auch seitens des Premix Lieferanten wurde diese starke Variation festgestellt und als ein Problem für die frühe Festbetonprüfung erkannt. Diese Problematik ist insbesondere auch für die Festlegung der Ausschulfristen, der Nachbehandlungsmethoden und frühesten Zeitpunkt der Belastung zu berücksichtigen.

#### BRUCHMECHANISMUS

An den aufgeschnitten Würfeln lässt sich das Bruchversagen gedrungener Probekörper erkennen (Bild 14). Die durch die Belastung erzeugte Querdehnung führt zu Querkzug im Querschnitt. Ab einer entsprechenden Last kann die Betonmatrix die Zugspannungen nicht mehr aufnehmen. Bei Erreichen der



Druckfestigkeit kommt es zum Abplatzen von Lamellen an der Oberfläche der Probe (Bild 14a). Der zentrale Bereich versagt zunächst nicht, da einerseits durch die Reibung an den Lasteinleitungsplatten und andererseits durch die Fasern die Querdehnung behindert wird. Folglich entsteht ein dreiaxialer Spannungszustand und eine höhere Last kann aufgenommen werden.

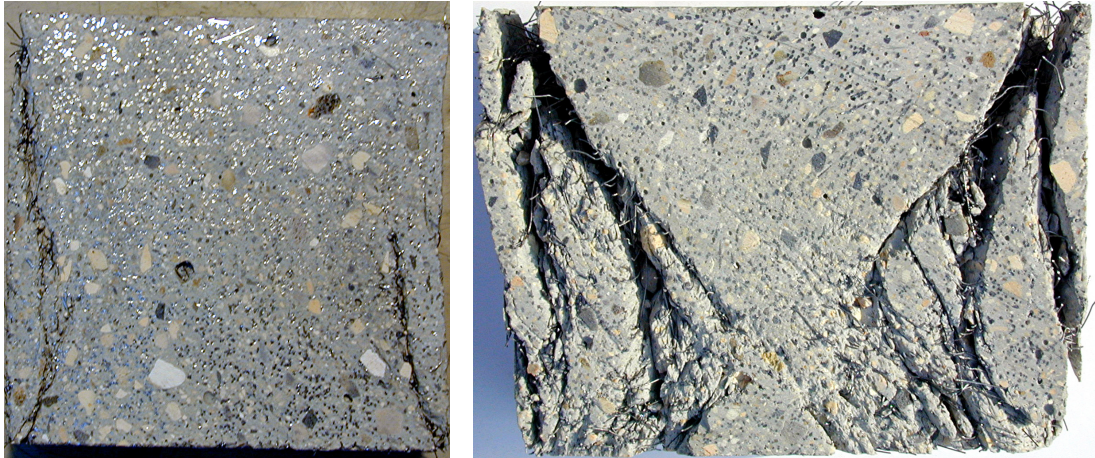


Bild 14 a/b: Bruchbild des aufgesägten Druckwürfels a) direkt nach Eintreten des Bruches b) bei weit fortgeschrittener Verformung

Der Probekörper kann weggesteuert weiter belastet werden. Der unbeschädigte mittlere Teil des Würfels kann weiterhin eine grosse Lastung tragen. Nach weiterer Steigerung der Verformung wird das Stadium Bild 14b erreicht. Hier sind sukzessive weitere Lamellen abgeplatzt, bis letztendlich nur der durch den dreiaxialen Spannungszustand entstandene Kegel (hier asymmetrisch) übrig bleibt. Hieraus lässt sich auch schliessen, dass der Effekt der behinderten Querdehnung durch die Reibung an der Oberfläche der Prüfplatten in diesem Zustand stärker ist, als der durch die Umschnürung durch die Fasern.

### 4.3 STEMPEDRUCKVERSUCHE

#### PROBEKÖRPER UND VERSUCHSAUFBAU

Es werden Prismen mit den Massen  $40 \times 40 \times \approx 80$  mm in einem Stempeldruckversuch (Stempelfläche  $40 \times 40$  mm) belastet (Prüfverfahren nach SN EN 266 [13]). Die Probekörper sind jeweils die grössere Bruchhälfte des in Kapitel 6.2 beschriebenen Drei – Punkt Biegeversuchs. Von jeder Mischercharge werden 3 Prismen hergestellt und getestet.



Bild 15: Stempeldruckversuch

#### ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der Stempeldruckversuche, sind in Tabelle 16 dargestellt. Die nominelle Stempeldruckfestigkeit  $f_{c,St}$  wird als der Quotient der Bruchkraft durch die Stempelfläche ( $40 \times 40$  mm) ermittelt. Der Mittelwert und die Standardabweichung

der drei Probekörper und des Chargenmittelwertes sind jeweils angegeben. Die Mischercharge Nummer 16 wurde ohne Faserbewehrung hergestellt und wurde entsprechend für die Ermittlung des Mittelwertes und der Standardabweichung nicht herangezogen.

Charge NR	13a	13b	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Gesamt
Probe 1	217	233	234	256	196	243	222	235	226	256	267	218	264	261	258	257	246	254	266	265	
Probe 2	231	245	238	241	184	252	244	236	244	251	221	262	262	269	258	261	258	252	270	255	
Probe 3	223	244	234	242	189	247	214	234	254	233	253	209	265	239	254	241	256	252	248	247	
$\bar{x}$	224	241	235	246	190	247	227	235	242	247	247	230	264	256	257	253	254	252	261	256	246
s	6.9	6.5	2.4	8.1	5.6	4.4	15.3	1.0	14.3	11.9	23.3	28.4	1.7	15.2	2.3	10.6	6.4	1.3	11.7	9.2	15.1

Tabelle 16: Ergebnisse der Stempeldruckversuche; Stempeldruckfestigkeit  $f_{c,St}$  [MPa]

Es zeigt sich eine relative kleine Streuung der Messwerte. Der grösste und der kleinste Mittelwert der Mischerchargen liegen nur rund 20% auseinander (256 MPa / 224 MPa). Der Mittelwert der Stempeldruckfestigkeit aller Probekörper liegt bei 246 MPa bei einer Standardabweichung von 15.1 MPa. Die Festigkeit der unbewehrten Proben liegt mit 190 MPa bei nur rund 75% der mittleren Festigkeit.

Das Histogramm zeigt eine weitgehend normal verteilte Kurve (Bild 16).

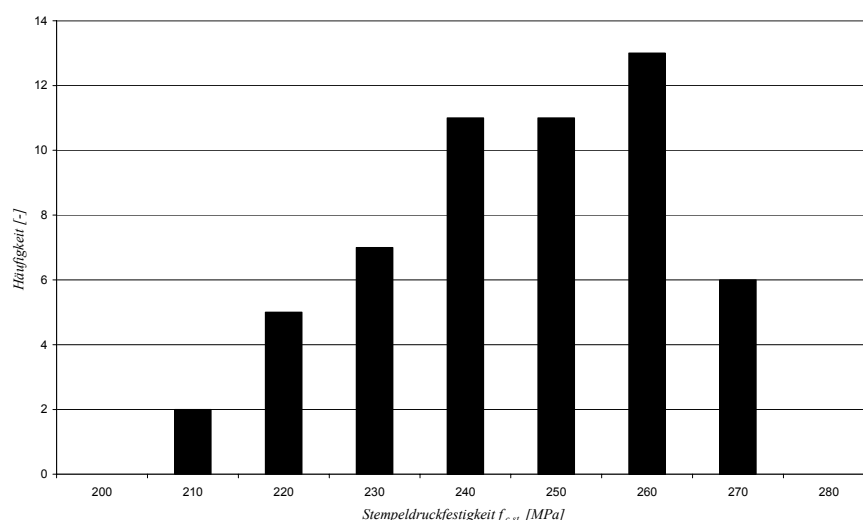


Bild 16: Verteilung der Bruchkraft der Probekörper bei den Stempeldruckversuchen

Bei genauer Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass es einzelne Proben gibt, die eine sehr viel geringe Festigkeit aufweisen. Dies kann eventuell durch eine Vorschädigung der Proben durch den vorangegangenen Biegeversuch begründet sein. Im Gegensatz zu Mörtelproben, die ursprüngliche Anwendung des hier genutzten Prüfsystems, kommt es bei UHFB zu einer verteilten Mehrfach-Rissbildung. Es besteht somit die Gefahr, dass durch den Biegeversuch die Probe im Bereich des Stempeldruckversuches bereits vorgeschädigt ist. Für zukünftige Prüfversuche ist es deshalb sinnvoll getrennte Prüfkörper für Biegezug und Druckversuche herzustellen. Hierfür erscheinen Zylinder  $\varnothing 70$  mm,  $h = 140$  mm oder besser  $\varnothing 110$  mm,  $h = 220$  mm als geeignet.

Ein weiterer Einfluss kann sich eventuell aufgrund der Temperatur beim Betonieren oder auch aus der unterschiedlichen Zusammensetzung der verschiedenen Herstellungsserien des Premixes ergeben. Zur Untersuchung dieser Problematik sind im folgenden Diagramm die ermittelte Stempeldruckfestigkeit gegenüber der Frischbetontemperatur mit Hinweis auf die Produktionsserie aufgetragen (Bild 17).



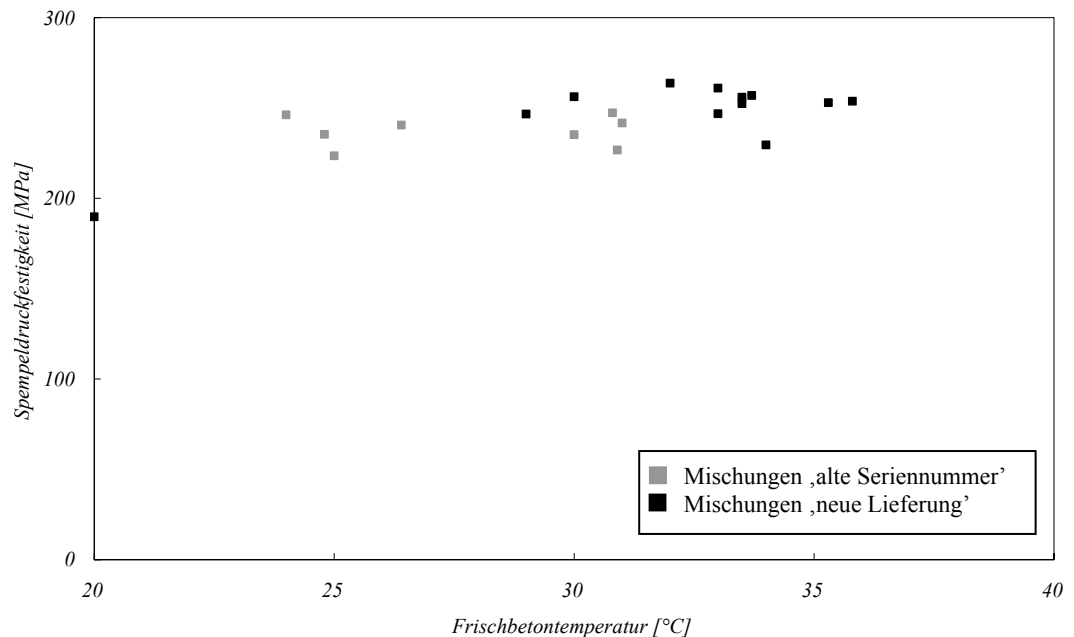


Bild 17: Einfluss der Frischbetontemperatur und der Herstellungsserie auf die Stempeldruckfestigkeit

Es zeigt sich, dass bei höherer Frischbetontemperatur (respektive Umgebungstemperatur) und bei Benutzung des Premixes der neuen Serie eine geringfügig höhere Stempeldruckfestigkeit erreicht wurde. Die Unterschiede der Mittelwerte beider Gruppen sind aber nur geringfügig und liegen bei rund 5%.

#### 4.4 VERGLEICH WÜRFEL-, ZYLINDER- UND STEMPELDRUCKFESTIGKEIT

Zum Vergleich der Resultate von Druckversuchen mit unterschiedlichen Versuchskörpertypen ist bei Normalbeton ein Massstabseffekt und ein Formeffekt zu berücksichtigen. Der Massstabseffekt ergibt sich durch die Inhomogenität des Materials und durch seine Sprödigkeit. Je kleiner der Prüfkörper ist, desto höher ist seine Festigkeit. Der Formfaktor ergibt sich durch die aufgrund der Reibung an den Oberflächen der Lasteinleitungsplatten behinderte Querdehnung. Es bildet sich hierdurch über den Lasteinleitungsflächen in einem kegelförmigen Bereich ein dreiachsiger Spannungszustand aus (siehe Bild 18a). Mit der Bruchbedingung von Mohr-Coulomb kann die Erhöhung der Festigkeit in Abhängigkeit eines lateralen Druckes beschrieben werden (siehe Bild 18b).

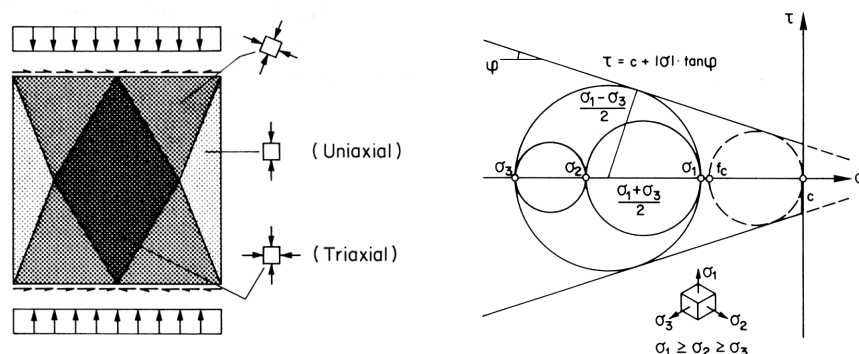


Bild 18 a/b: a, dreiachsiger Spannungszustand durch Behinderung der Querdehnung [6]  
b, Gesetz von Mohr – Coulomb [6]

Bei gedrunenen Querschnitten (Würfel) herrscht der dreiachsige Spannungszustand in grossen Teilen des Querschnittes, wodurch sich die Festigkeit des Probekörpers erhöht. Längliche Querschnitte weisen hingegen im mittleren Bereich einen quasi uniaxialen Spannungszustand auf. Die Festigkeit ist entsprechend geringer.

Bei ultrahochfestem Beton ergibt sich aufgrund der grossen Homogenität, der grossen Sprödigkeit und der beigemischten Fasern besondere Bedingungen, welche sowohl den Massstabseffekt als auch den Formfaktor beeinflusst.

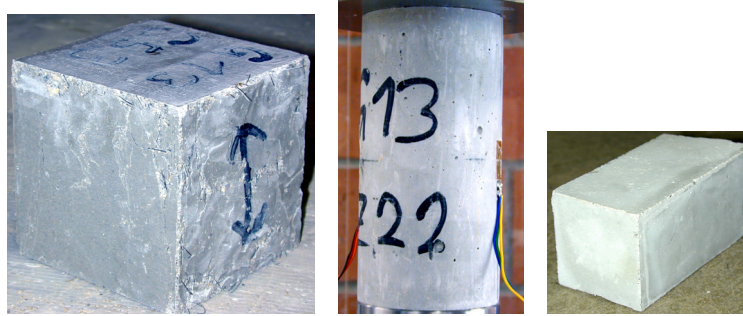


Bild 19 a/b/c: Unterschiedliche Festigkeiten der verschiedenen Prüfkörpergeometrie (Würfel 100 mm Kantenlänge), Zylinder Ø 70 mm, h = 140 mm und dem Prisma (40 x 40 x ≈80 mm)

Betrachtet man die Messergebnisse der drei in Bild 19 dargestellten Druckprüfkörper (Druckwürfel 100 x 100 mm, Zylinder Ø70 mm, h = 140 mm und Prisma 40 x 40 x ≈80 mm), so zeigt sich, dass die vom Normalbeton bekannten Relationen hier nicht angewandt werden können.

In Tabelle 17 sind die für den UHFB ermittelten Festigkeiten dargestellt.

	Würfel			Zylinder				QS-Prisma		
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Charge 12	201	211	207							
Charge 13a	205	189	197	191	196	195	181	217	231	223
Charge 15								256	241	242
$\bar{x}$	202			191				235		
s	8.0			6.8				14.2		

Tabelle 17: Festigkeiten der verschiedenen Probekörpergeometrien

Im Bild 20 ist die Druckfestigkeit bzw. die bezogene Druckfestigkeit gegenüber der Prüfkörpergeometrie (Verhältnis von Höhe zu Breite bzw. Durchmesser) aufgetragen. Zum Vergleich ist der Formfaktor für Normalbeton angegeben [4]. Für die Stempeldruckversuche kann aufgrund der besonderen Prüfkörpergeometrie kein Formfaktor angegeben werden. Der Massstabseffekt wird in dieser Darstellung nicht berücksichtigt.

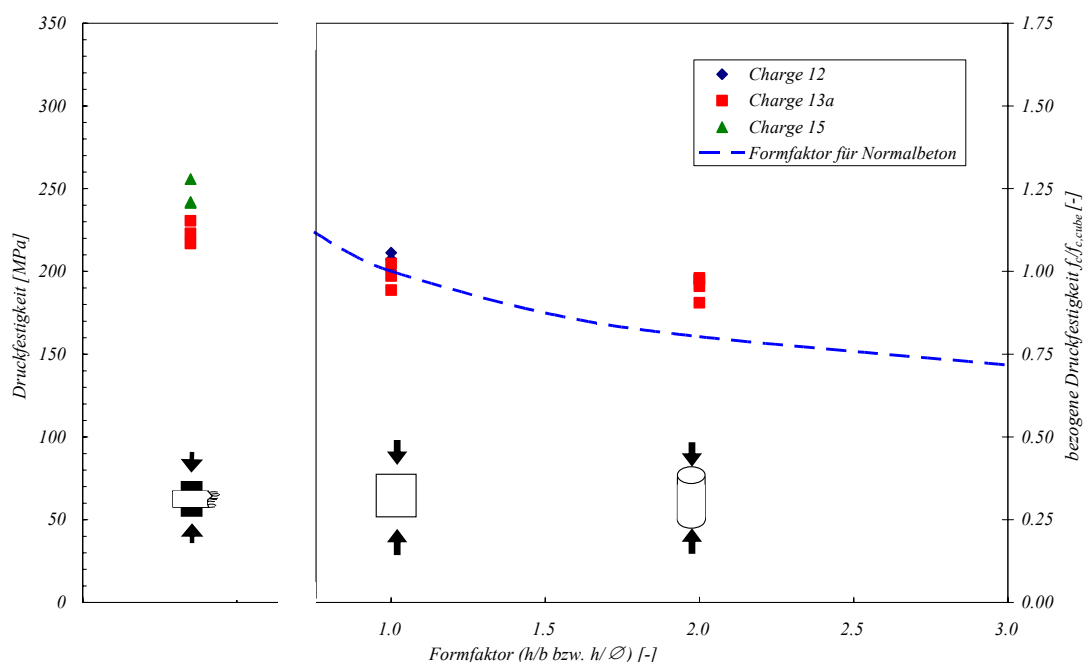


Bild 20: Festigkeiten verschiedener Prüfkörpergeometrien bei 28 Tagen Prüfzeitpunkt

Es zeigt sich, dass sich im Vergleich zu Normalbeton die Geometrie des Prüfkörpers bei den getesteten UHFB geringfügiger auf seine Festigkeit auswirkt. Eine genaue Kalibrierung eines Umrechnungsfaktors ist wegen der geringen Probenanzahl nicht möglich, doch kann die Umrechnung Zylinder- zu Würfeldruckfestigkeit für die hier verwendeten UHFB wie folgt abgeschätzt werden:

$$f_{c,cube} = 1.05 \cdot f_c$$

Bild 21 zeigt die Beziehung zwischen Würfeldruckfestigkeit  $f_{c,cube}$  und Zylinderdruckfestigkeit  $f_c$ . Es sind einerseits die von der Norm vorgeschlagenen Verhältnisse wie auch die Versuchsergebnisse dargestellt. In Normen neuerer Generation (z.B. EC2), werden bereits die bei zunehmenden Betonfestigkeiten geringeren Festigkeitsunterschiede zwischen den verschiedenen Prüfkörpergeometrien berücksichtigt. Der Umrechnungsfaktor von  $f_{c,cube} = 1.25 \cdot f_c$  ist nur bei niedrigen Betonfestigkeiten anwendbar.

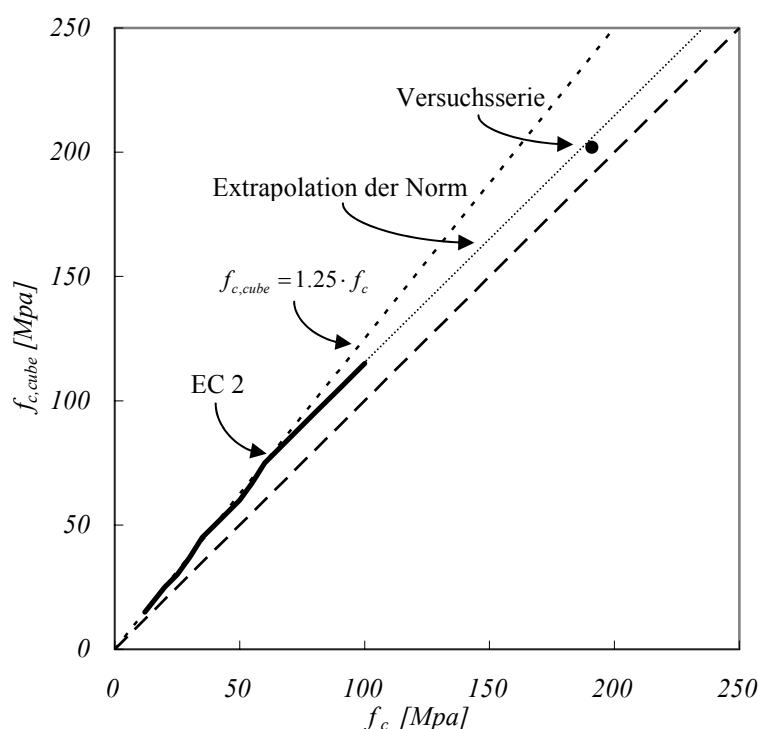


Bild 21: Beziehung zwischen Würfeldruckfestigkeit  $f_{c,cube}$  und Zylinderdruckfestigkeit  $f_c$  im Vergleich mit der Norm

Durch die beigemischten Fasern ergibt sich ein gewisser umschnürender Effekt, der die Querdehnung der Probekörper behindert. Es entsteht hierdurch bei Belastung ein dreiaxialer Spannungszustand im gesamten Probekörper. Bezüglich des Formfaktors bedeutet dies, dass nun nicht nur die Bereiche über den Lasteinleitungsplatten eine höhere Spannung aufnehmen können, sondern der gesamte Querschnitt. Der Einfluss der Querausdehnungsbehinderung im Lasteinleitungsbereich verliert in Relation zur Festigkeit der gesamten Probe an Gewicht. Folglich ist entsprechend auch die Form (Schlankheit) weniger relevant für die Festigkeit der Probe.

Bezüglich des Massstabeffekts können aus den hier ausgeführten Versuchen keine Rückschlüsse gezogen werden, da jeweils sowohl die Form als auch der Massstab der Probekörper variiert wurde. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass sich bei den hier verwendeten, nur geringfügig unterschiedlichen Probenabmessungen der Massstabeffekt nur geringfügig auswirkt [4]. Weiterhin ist durch die grössere Homogenität des UHFB und somit geringere Anzahl an Defekten (Weibull – Theorie) zusätzlich ein geringerer Massstabeffekt als bei Normalbeton zu erwarten.

Trotzdem ist sicherlich beim Stempeldruckversuch neben der Form auch die kleine Abmessung für die hohe Festigkeit verantwortlich.

## 5 ZUGVERSUCH

### 5.1 ZUGVERSUCHE MIT KONSTANTEM QUERSCHNITT

Es werden axiale Zugversuche mit beidseitig eingespannten Probekörpern mit konstantem Querschnitt in der Messzone durchgeführt. Hiermit sollen bestmöglich die Belastung und die Spannungsverhältnisse wie sie innerhalb eines Tragwerks auftreten wieder gespiegelt werden.

Für konstruktive Anwendungen ist hierbei insbesondere das Verhalten bis zum Bruch interessant. Die Proben werden nach dem Erreichen der Zugfestigkeit dennoch weiter verformt, um auch das Nachbruchverhalten zu untersuchen. Es lassen sich hiermit die Verformungskapazität und die Sicherheitsreserven des Materials abschätzen.

Um die Beteiligung der einzelnen Bestandteile (Fasern und zementöse Matrix) am Tragverhalten differenziert betrachten zu können, werden ergänzend Versuche ohne Faserzuschlag durchgeführt. Insgesamt werden drei faserbewehrte und zum Vergleich eine unbewehrte Probe getestet.

#### PROBEKÖRPER

Die Zugversuche werden an in der Mitte knochenförmig verjüngten Probekörpern durchgeführt. Sie haben eine Länge von 700 mm, eine Breite von 200 bzw. 160 mm und eine Dicke von 45 mm. Es ergibt sich eine Querschnittsfläche von  $8000 \text{ mm}^2$  in der 200 mm langen Messzone (Bild 22).

#### VERSUCHSAUFBAU, MESSEINRICHTUNG UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Der Versuch wird als Zugversuch mit beidseitig eingespanntem Probekörper durchgeführt. Die Probe wird in die Halterung eingeklebt um mögliche Exzentrizitäten und Rotationen zu vermeiden. Die Verklebung erfolgt auf einer Länge von 100 mm, wobei die Negativform der Halterung geriffelt ausgeführt ist um eine homogene Krafteinleitung zu gewährleisten (siehe auch [3]).

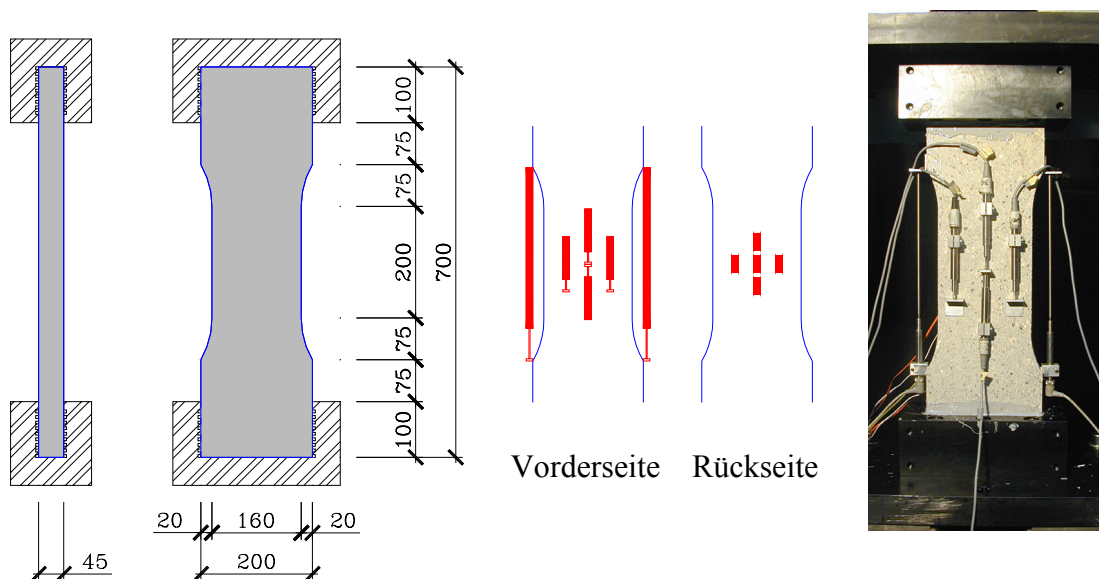


Bild 22 a - c: Zugversuche; a) Probekörper (Masse in mm), b) Messeinrichtung, c) Versuchstand

Mit 4 induktiven Wegaufnehmern werden die Verformungen im Bereich der Messzone aufgenommen. Zum Vergleich wird auf der Rückseite die Dehnung mit 5 DMS aufgenommen. Der Versuch wird mit 2 Wegaufnehmern, die ausserhalb der Messzone befestigt sind, weggesteuert gefahren. Die Belastungsgeschwindigkeit beträgt zwischen 0.33 mm/min (Proben G14T1-3) und 0.08 mm/min (Probe G16T5 ohne Fasern). Mit einer maschineninternen Kraftmessdose wird die Belastung kontinuierlich aufgezeichnet.

## ERGEBNISSE

Das Versagen der faserbewehrten Probekörper G14T1-3 beginnen zunächst mit der Ausbildung vieler sehr feiner Haarrisse, welche mit blossen Auge teilweise nur sehr schwer zu erkennen sind. Bei weiterer Belastung schreitet diese multiple Mikrorissbildung fort, bis an einer oder mehreren Stellen, meist in der Nähe des Randes, der bzw. die Risse sich vergrössern. Diese Mesorisse entwickelt sich sukzessive quer durch den Querschnitt, wobei sie sich teilweise verzweigen oder sich mit anderen Mesorissen vereinen (siehe Bild 23). Die Risse umwandern hierbei die Zuschlagkörner nicht in ihrer Kontaktfläche (vgl. Normalbeton) sondern zerreißen sie ohne eine Ablenkung zu erfahren (vgl. Hochfesterbeton). Durchquert einer der Mesorisse den Querschnitt komplett, konzentriert sich die weitere Verformung auf diesen Riss und es bildet sich ein Makroriss aus. Bei der Rissöffnung ist ein lautes Knacksen zu hören, welches auf das Ausreißen einzelner Fasern zurückgeführt wird (siehe Kapitel 5.2 Zugversuche mit gekerbter Probe).

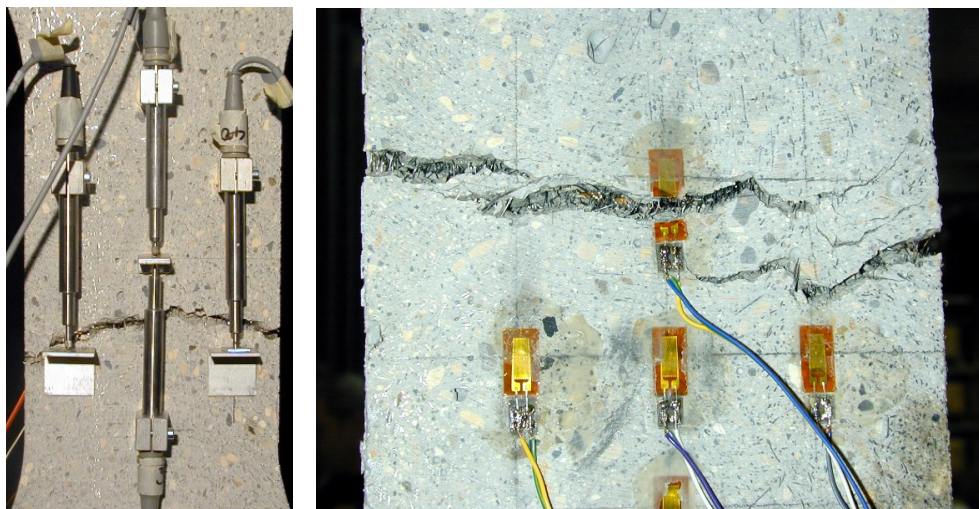


Bild 23 a/b: Rissbildung im Bereich der Messinstrumente bei Proben G14T1 (links) und G14T2 (rechts)

Das Versagen der nicht faserbewehrten Probe ist hingegen schlagartig und spröde. Es kündigt sich nicht durch eine langsame Rissbildung an, sondern versagt spontan über den gesamten Querschnitt. Der Bruch liegt hier leider ausserhalb der Messzone, doch würde eine Messung des Nachbruchverhaltens sowieso keinerlei Aussage bringen (siehe Bild 24).

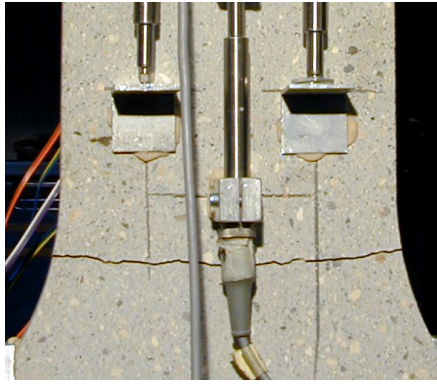


Bild 24: Rissbild der unbewehrten Probe

In Bild 25 ist die Spannungs – Dehnungskurve der Versuchskörper G14T1 bis 3 dargestellt. Die Kurven wurden aus dem Mittelwerten der jeweils den Hauptriss überspannenden induktiven Wegaufnehmern ermittelt (siehe als Bsp. Bild 23a). Entsprechend wurden folgende Wegaufnehmer für die einzelnen Proben benutzt:

- G14T1: induktive Wegaufnehmer Nord (links) und Süd (rechts)
- G14T2: induktive Wegaufnehmer Nord (links) und Süd (rechts)
- G14T3: induktive Wegaufnehmer Unten

Kurven aller Messfühler (Wegaufnehmer und Dehnmessstreifen) für alle Prüfkörper befinden sich im Anhang.

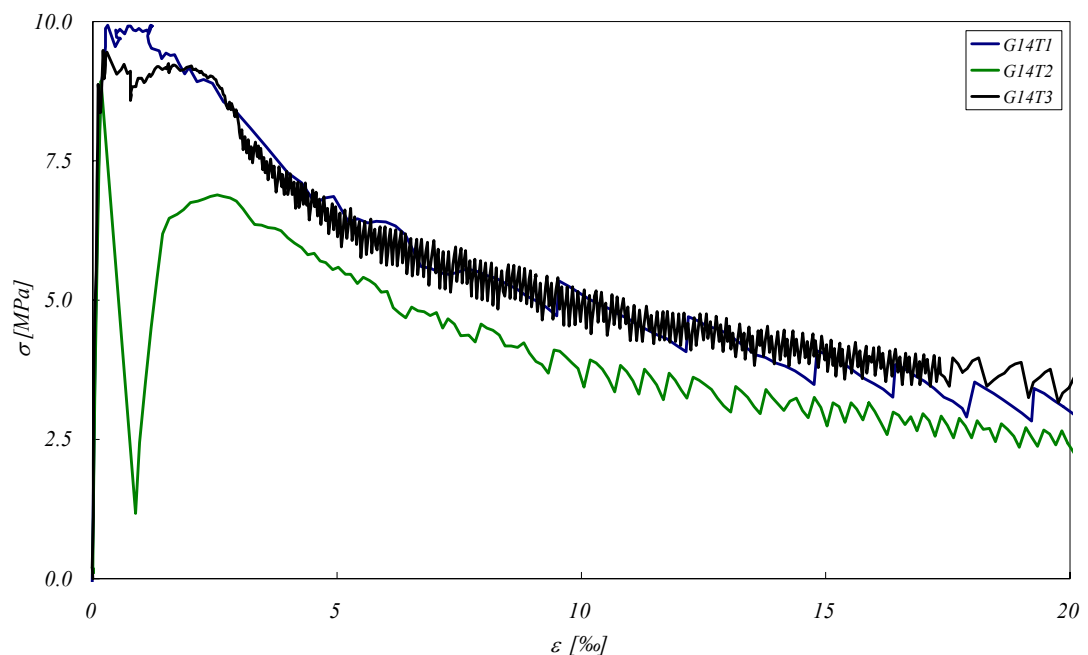


Bild 25: Spannung – Dehnungskurve der Zugversuche (Mittelwert der rissüberspannenden Wegaufnehmer), Messlänge = 100 mm

Für die faserbewehrten Proben zeigt sich ein linearer Verlauf mit einem mittleren E – Modul von 63 GPa bis zu einer Festigkeit von rund 8.5 MPa. Anschliessend erfolgt eine weitere Steigerung der Last um rund 20%, bis bei knapp 10 MPa die Festigkeit erreicht ist. Folgend bleibt die Spannung annähernd konstant bis zu einer Dehnung von rund 2.5‰. Anschliessend fällt die Kraft parabolisch ab.

Die Probe G14T2 weist als „Ausreisser“ einen grossen Spannungssprung direkt nach dem Riss auf. Dieser ergibt sich durch eine schlagartige weite Rissöffnung bei weggesteuerter Versuchsdurchführung. Diese Rissöffnung wird auf eine Materialienhomogenität zurückgeführt, durch die es zu einer asymmetrischen Verformung kommt, welche zu einem anderen Versagensmodus mit niedrigerer



Festigkeit führt (grosser Biegespannungsanteil). Im restlichen Verlauf verhält sich die Probe wieder vergleichbar mit den anderen Proben.

Im Vergleich verhält sich die unbewehrte Probe viel spröder (Bild 26). Bei ähnlichem E-Modul wird eine, gegenüber der Elastizitätsgrenze der faserbewehrten Proben, geringfügig niedrigere Festigkeit erreicht werden. Eine weitere Steigerung der Festigkeit wie bei den bewehrten Proben findet nicht statt. Somit ist die Endfestigkeit der unbewehrten Probe um rund 20% niedriger.

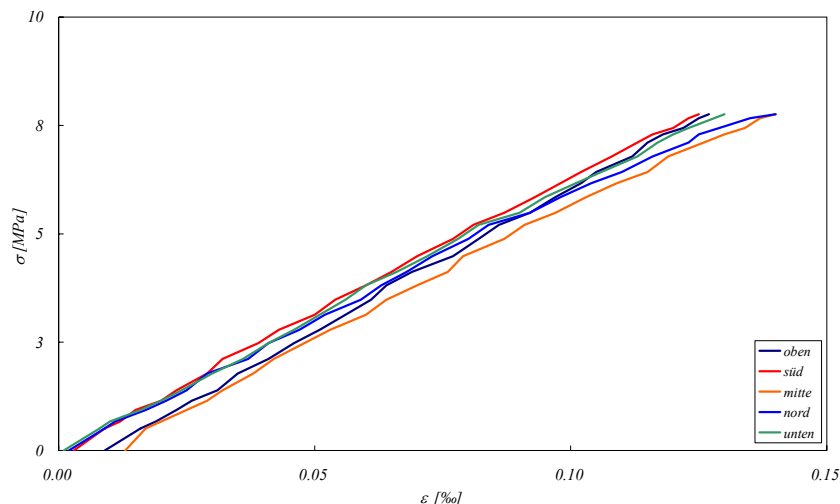


Bild 26: Spannungs – Dehnungsdiagramm der unbewehrten Probe G16T5; Messwerte der DMS

In Tabelle 18 sind die Messwerte der einzelnen Proben dargestellt.

	elastischer Bereich				max Festigkeit		Ende Plateau	
	$E_{\text{induktif}}$	$E_{\text{DMS}}$	$\epsilon_{\text{ct,Matrix}}$	$\sigma_{\text{ct,Matrix}}$	$\epsilon_{\text{ct}}$	$\sigma_{\text{ct}}$	$\epsilon_{\text{ct,Plateau}}$	$\sigma_{\text{ct,Plateau}}$
	[GPa]	[GPa]	[‰]	[MPa]	[‰]	[Mpa]	[‰]	[MPa]
<b>G14T1</b>	59	67	0.16	8.8	0.3	9.9	2.5	8.9
<b>G14T2</b>	63	62	0.17	8.9	-	-	2.5	6.9
<b>G14T3</b>	67	64	0.11	8.9	0.3	9.5	2.5	8.9
<b><math>\bar{x}</math></b>	63	64	0.15	8.9	0.3	9.7	2.5	8.2
<b>s</b>	4.00	2.52	0.03	0.06	0.00	0.28	0.00	1.15
<b>G16T5 (ohne Fasen)</b>	63	57	0.14	7.8	-	-	-	-

Tabelle 18: Zusammenfassung der Ergebnisse der Zugversuche; E-Modul der Zugproben ermittelt aus Wegaufnehmern und DMS zur Reduktion evt. Exzentrizitäten

Betrachtet man den absteigenden Ast der Kurven der bewehrten Proben genauer, so erkennt man eine Folge von Spannungssprüngen (siehe Bild 27). Diese entstehen durch das Ausreissen einzelner Stahlfasern in der Rissöffnungsphase.

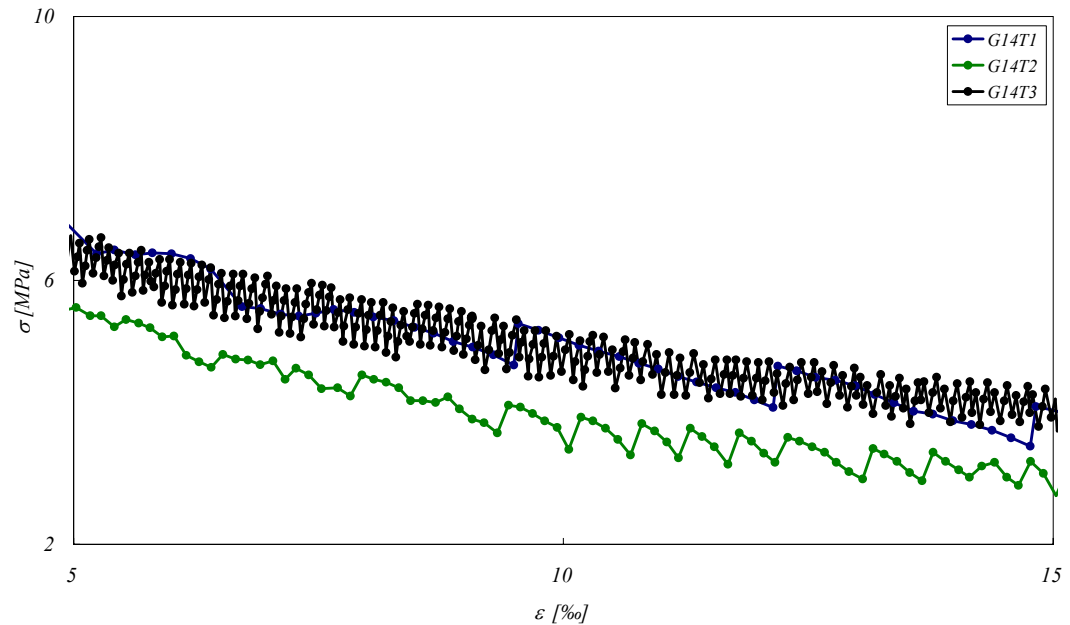


Bild 27: Absteigender Ast – Problem der ‚Auflösung‘ der Messwerte

Trägt man in die Kurve die einzelnen Messwerte ein, erkennen man, dass nur bei Probe G14T3 die Aufzeichnungsgeschwindigkeit ausreichend hoch lag um eine ausreichende Auflösung für die Darstellung der einzelnen Spannungssprünge zu erhalten (Tabelle 19). Die Messwerte der Proben G14T1 und 2 überspringen jeweils ein bzw. mehrere Zyklen, wodurch es zu einem willkürlichen Kurvenverlauf kommt. Die Mittelwerte und somit die Charakteristik des gesamten Kurvenverlaufs sind hiervon weitgehend unbeeinflusst.

	Fasern	$v_{\text{Belastung}}$ [mm/min]	Auflösung	Rissbildung		Bemerkung
				Induktiv	DMS	
G14T1	ja	0.33	sehr grob	innerhalb N-S-U	knapp oberhalb U	
G14T2	ja	0.25	grob	zwischen N-S unter Messp. Mitte	durch O knapp oberhalb N	Lastsprung nach Initialriss
G14T3	ja	0.16	zeigt Peaks	zwischen und unterhalb U	unterhalb U	2 Risse, 1 Riss ausserhalb des Messbereichs
G16T5	nein	0.08		unterhalb U	unterhalb U	nur 1 Riss, dieser liegt ausserhalb des Messbereichs

Tabelle 19: Belastungsgeschwindigkeit und ‚Auflösung‘ der Messwerte

Das Phänomen des Faserausreissens wird im Abschnitt 5.2 Zugversuche mit gekerbte genauer untersucht. Diese Versuche wurden entsprechend mit einer niedrigeren Belastungsgeschwindigkeit gefahren um eine präzise Auflösung der Sprünge zu erhalten.

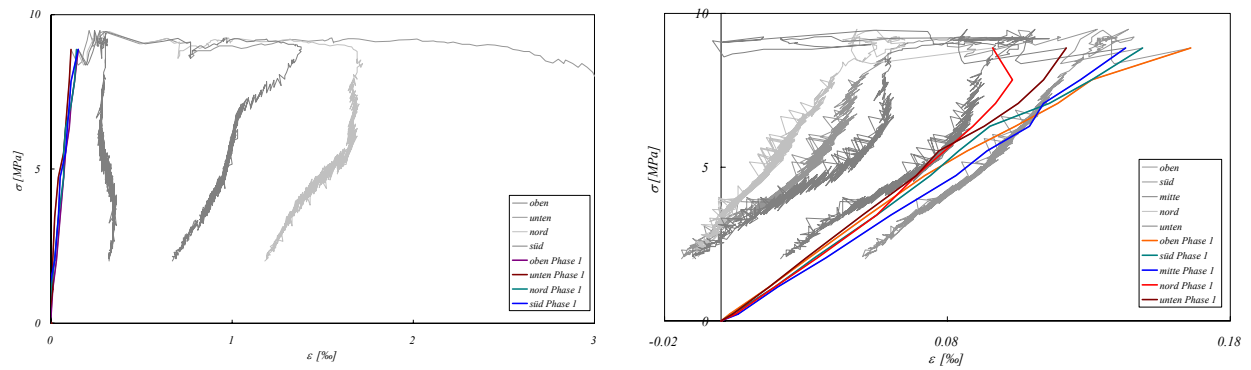
#### ANALYSE DER VERSAGENSPHASEN

Der grundsätzliche Verlauf der Spannungs - Dehnungslinie faserbewehrter Zugproben und dessen Bruchbild wurden im obigen Abschnitt erläutert. Um die Vorgänge noch besser zu verstehen und eine Grundlage für eine Modellbildung zu erhalten, wird folgend anhand der Probe G14T3 das Zugverhalten genauer analysiert.

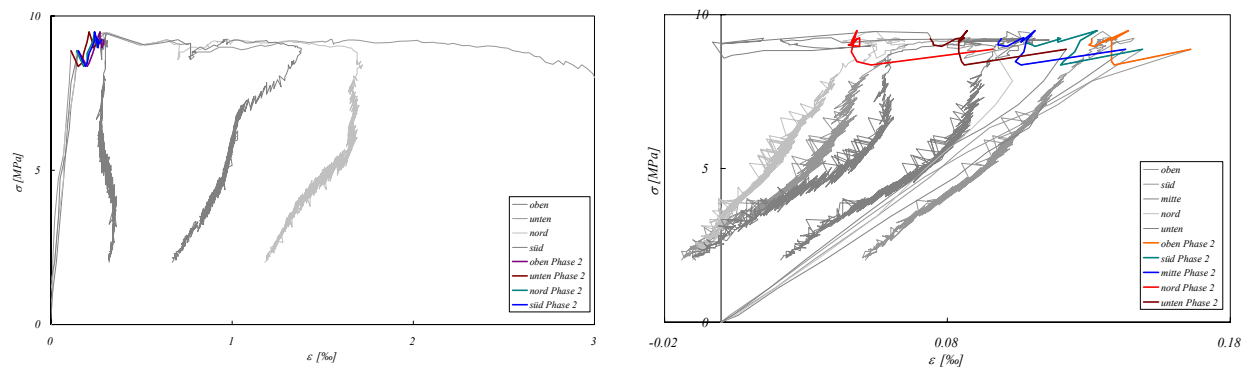
In Bild 28 sind hierfür die Spannungs - Dehnungskurven der induktiven Wegaufnehmer und der Dehnmessstreifen aufgegliedert in die vier Versagensphasen dargestellt. Die Kurve jedes einzelnen Messfühlers ist jeweils komplett dargestellt (grau). Der Bereiche der jeweiligen Phase ist jeweils farblich hervorgehoben.



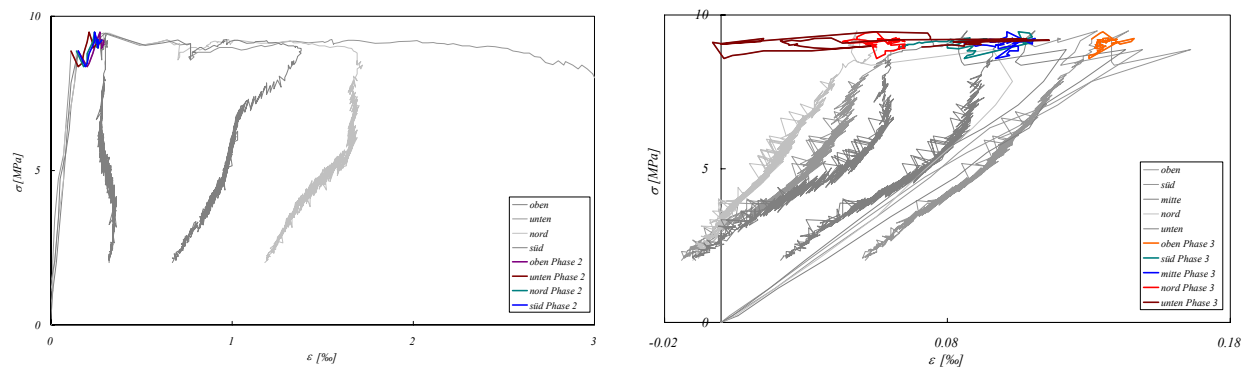
### Phase 1: Linear - elastische Verformung – Zementmatrix ungerissen



### Phase 2: Multirissbildung - Mikrorisse



### Phase 3: Öffnung zu Mesorissen – aktivieren der Fasern bis zum Ausriss der Fasern



### Phase 4: Öffnen von einem oder mehrerer Makrorissen – vorschreitender Ausriss der Fasern

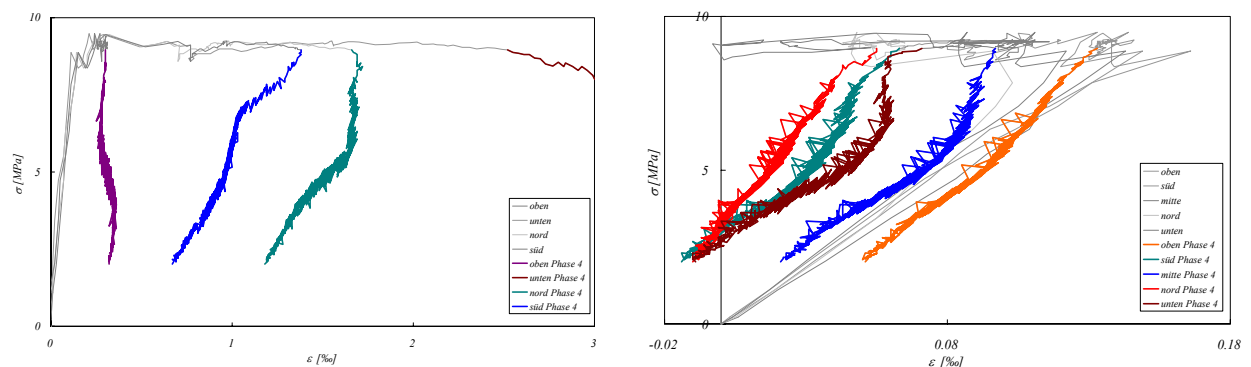
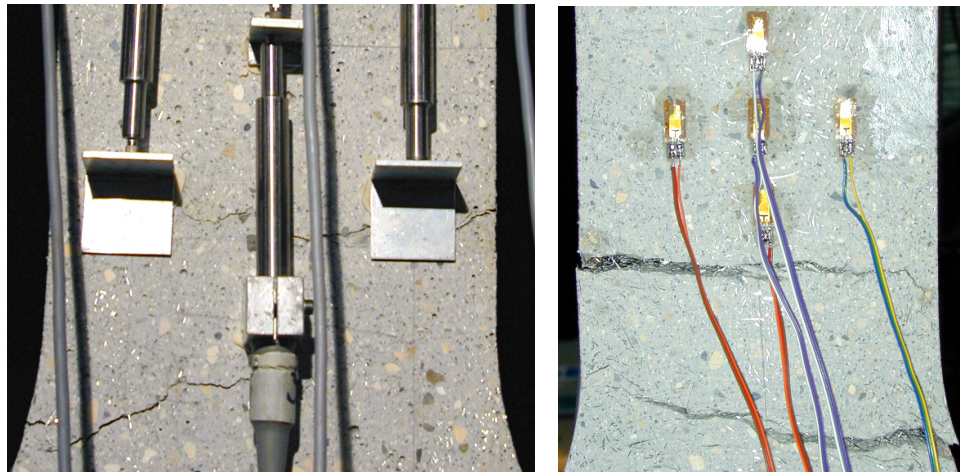


Bild 28 a-h: Analyse der einzelnen Versagensphasen der Zugprobe G14T3: Spannungs - Dehnungskurven der Wegaufnehmer  $l=100$  mm (links) und der DMS (rechts)

Zur Interpretation der Messergebnisse ist es nötig, die genaue Lage der Risse zu kennen. Bei der Probe G14T3 haben sich 2 Risse ausgebildet (Bild 29). Die Risse liegen unterhalb der induktiven Wegaufnehmer ‚nord‘ und ‚süd‘ im Messbereich von ‚unten‘. Der zweite Riss liegt ausserhalb des Messbereichs unterhalb von ‚unten‘. Auf der Seite der DMS liegen die Risse unterhalb des Messbereiches.



*Bild 29: Lage der Risse der Probe G14T3*

Folgend werden die Vorgänge in den einzelnen Phasen analysiert:

**Phase I:** Linear - elastische Verformung - Zementmatrix ungerissen

Die Probe wird bis zum Erreichen der Matrixfestigkeit bei 8.9 MPa linear - elastisch verformt. Der annähernd gleiche E-Modul von rund 65 GPa auf der Vorder- und Rückseite zeigt, dass die Probe zentrisch eingebaut und beansprucht ist. Gegen Ende sind bei den DMS erste Streuungen zu erkennen, welche auf den Beginn einer Rissbildung hinweisen. Das Verformungsverhalten dieser ersten Phase hängt in erster Linie von den Eigenschaften der Betonmatrix ab. Die eingebetteten Fasern haben nur einen sehr geringen Einfluss, da sie bei der sehr geringen Dehnung noch nicht ‚aktiviert‘ sind.

**Phase II:** Multirissbildung von Mikrorissen – ‚verfestigendes Verhalten‘

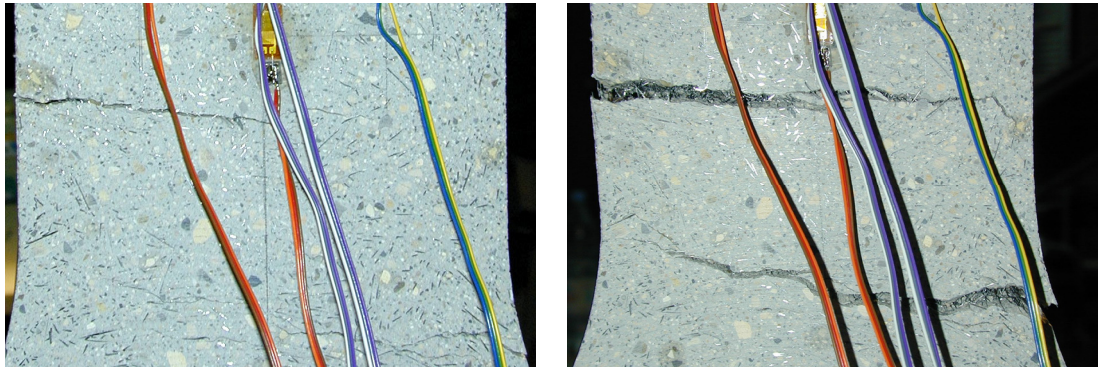
Am Anfang dieser Phase markiert ein Spannungsabfall den Beginn der Rissbildung. Die Verformung der rissüberspannenden Wegaufnehmer nimmt zu und die Dehnung der nicht rissüberspannenden DMS nimmt ab. Die sprunghafte Abnahme der Dehnung der DMS ergibt sich bei dem weggesteuerten Versuch durch die Rissöffnung, welche gleichzeitig zu einer Verkürzung der Matrix führt. Bei weiterer Verformung der Probe steigt die Spannung wieder an und die DMS verzeichnen erneut eine Erhöhung der Dehnung. Der verbleibende negative Dehnungssprung ergibt sich vermutlich durch Imperfektionen (Materialienhomogenitäten oder Imperfektion der Form). Hierdurch entstehen Biegemomente, welche sich in den beiden Zuständen (ungerissen und gerissen) unterschiedlich auf die Spannungen auf der Vorder- und Rückseite der Probe auswirken.

Die entstehenden Risse sind zunächst mit blossen Auge nicht sichtbar (Mikrorisse). Die grossen Unterschiede der Messwerte der DMS und die Verlängerung aller Wegaufnehmer weisen darauf hin, dass sich an mehreren Stellen Risse ausgebildet haben (Multirissbildung). Die Belastung kann infolge bis auf eine Spannung von 9.5 MPa weiter gesteigert werden. Dies bedeutet, dass die Summe der Kräfte der rissüberbrückenden Fasern grösser ist, als die Festigkeit der Matrix. Ein so genanntes verfestigendes Verhalten tritt ein.

**Phase III:** Öffnung zu Messorissen – aktivieren der Fasern bis zum Ausriss der Fasern

Nach Ende der zweiten Phase bleibt die Deformation des Wegaufnehmers ‚oben‘ konstant, während die anderen Wegaufnehmer alle einen weiteren Anstieg der Deformationen anzeigen. Dies deutet darauf hin, dass sich nun ein oder einige wenige Risse in der unteren Hälfte des Versuchskörpers öffnen.

Mit dem Abschluss der Mehrfachrissbildung öffnen sich in dieser Phase die Risse zu Messorissen. Die rissüberbrückenden Fasern werden gestreckt bzw. ‚aktiviert‘ bis die Haftverbundspannung zwischen Fasern und Matrix erreicht wird. Hierbei bildet sich der bzw. die Risse weiter aus, bis er/sie den Querschnitt komplett durchtrennt hat/haben (Bild 30). In den verschiedenen Versuchen wurde jeweils nur die Ausbildung von ein oder zwei Rissen beobachtet. Es bilden sich folglich nicht alle Mikrorisse weiter aus sondern immer nur Einzelne.



*Bild 30: Risswachstum vom Messoriss zum Makroriss*

**Phase IV:** Öffnen von einem oder mehrerer Makrorissen – vorschreitender Ausriss der Fasern

Es kommt zu einer zunehmenden Rissöffnung (Makroriss) bei abnehmender Spannung. Mit dem rissüberspannenden Wegaufnehmer kann die Rissöffnung beobachtet werden. Die anderen Wegaufnehmer verkürzen sich mit abnehmender Spannung. Bild 31 stellt die Rissöffnungsphase noch mal im geeigneten Massstab da.

Die einzelnen Spannungsspitzen der Kurve ‚unten‘ gehen jeweils mit einem lauten Knacken durch das Ausreissen der Fasern einher. An der Bruchfläche kann man später erkennen, dass die Fasern alle ausgerissen werden (Verbundversagen) und nicht durch Überschreiten ihrer Fließgrenze versagen.

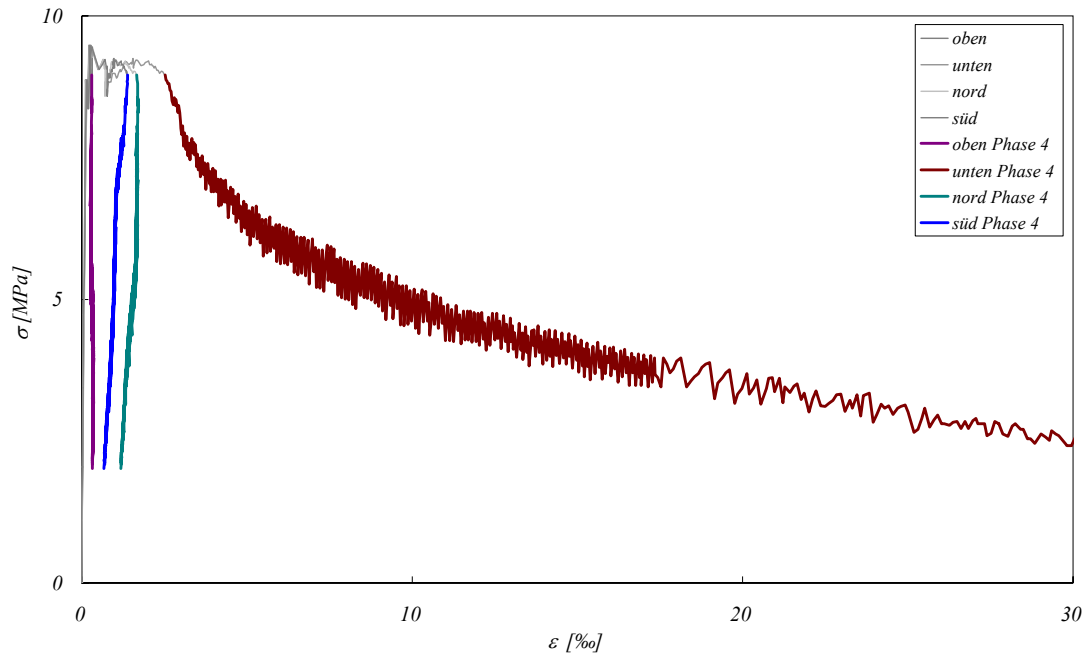


Bild 31: Spannungs – Dehnungsdiagramm inkl. Rissöffnung der Probe der Zugprobe G14T3 (Messlänge 100 mm)

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die hohe Verbundfestigkeit zwischen der Matrix und den Fasern insbesondere von dem guten Haftverbund des UHFB herrührt. Die Zugfestigkeit des Querschnittes ergibt sich aus dem Haftverbund zwischen Matrix und Faser, der Verbundfläche (Fasermenge, -länge und -durchmesser) und einem Faktor für die Faserorientierung.

Während der Rissöffnung versagt sukzessive der Haftverbund der einzelnen Fasern (Spannungssprünge). Infolge sind diese Fasern nur mehr durch einen sehr viel geringeren Gleitverbund an der Lastabtragung beteiligt.

Das Verhalten der hier getesteten Zugelemente aus UHFB lässt sich wie folgt schematisch darstellen (Bild 32):

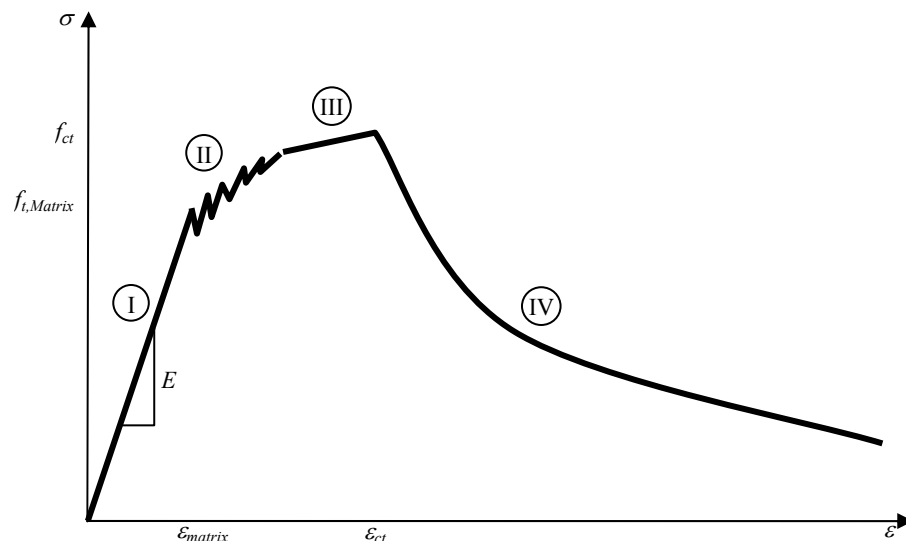


Bild 32: Schematische Spannungsdehnungsline des Zugverhaltens des getesteten UHFB

Phase I: Linear - elastische Verformung - Zementmatrix ungerissen

Phase II: Multirissbildung von Mikrorissen – ‚verfestigendes Verhalten‘

Phase III: Öffnung zu Mesorissen – aktivieren der Fasern bis zum Ausriss der Fasern

Phase IV: Öffnen von einem oder mehreren Makrorissen – vorschreitender Ausriss der Fasern

Aufgrund von Vergleichen mit Versuchen aus der Literatur [1] und eigenen Versuchen [9] lässt sich feststellen, dass die Form der Kurve grundsätzlich für alle faserverstärkten ultrahochfesten Betone ähnlich ist. Die Ausbildung der einzelnen Phasen variiert in Abhängigkeit der Zusammensetzung des jeweiligen UHFB. Die Steigungen und Längen der Phasen im ungerissenen Bereich hängen in erster Linie von der Charakteristik der Zementmatrix ab. Im Bereich nach der Rissbildung sind insbesondere die Fasern (Länge, Menge und Durchmesser) massgebend für die Länge und Neigung der jeweiligen Phase. Auch die Verbundeigenschaften der Matrix haben hier einen Einfluss.

## 5.2 ZUGVERSUCHE MIT GEKERBTER PROBE

Um die Rissöffnungsverhalten und den Ausziehprozess der Fasern zu untersuchen, werden Zugversuche an gekerbten Proben durchgeführt. Mit einer Untersuchung einzelner Spannungssprünge während der Rissöffnung wird das Verbundverhalten der eingelagerten Stahlfasern mit der Zementmatrix analysiert.

Durch mehrfache Vorbelastung wird bei einer eingekerbten Zugprobe ein genau definierter Riss ausgebildet. Die Kraftübertragung zwischen den Rissufern erfolgt nun weitgehend durch die Fasern. Belastet man diese Probe nun weiter, kann man das Ausziehverhalten der Stahlfaser beobachten. Geht man von einer homogenen Verteilung und willkürlichen Orientierung der Fasern aus, lässt sich unter Berücksichtigung des Fasergehalts auf das Verhalten einer konkreten Faser schliessen.

### PROBEKÖRPER

Die Proben haben eine Länge von 500 mm, eine Breite von 200 mm und eine Dicke von 46 mm bis 48 mm. Sie sind in der Mitte seitlich um jeweils 2 mm eingekerbbt (Bild 33). Im Rahmen der Versuchsserie werden drei Probekörper getestet.

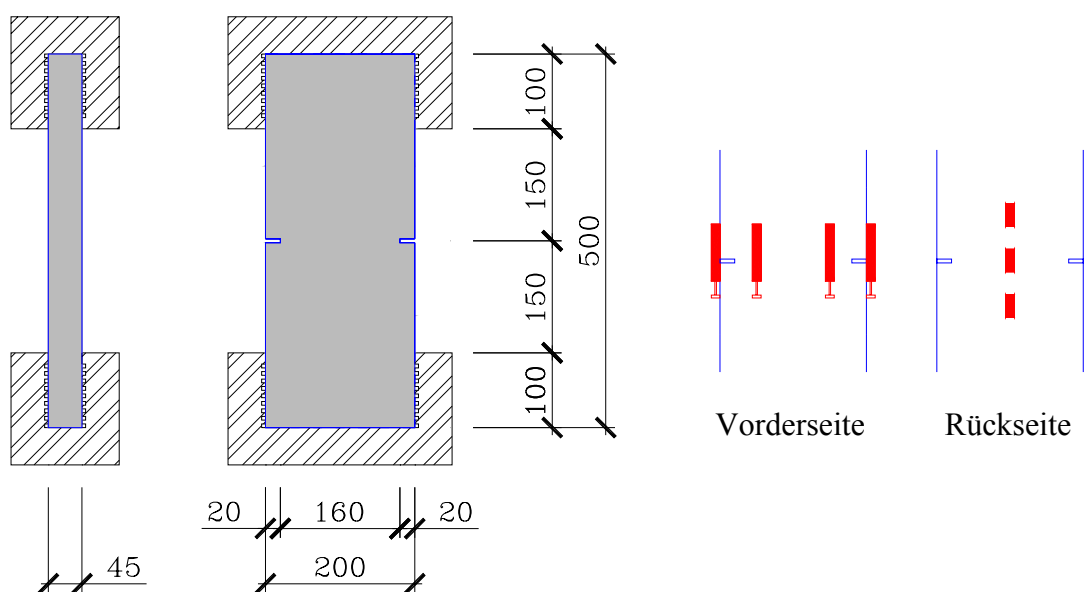


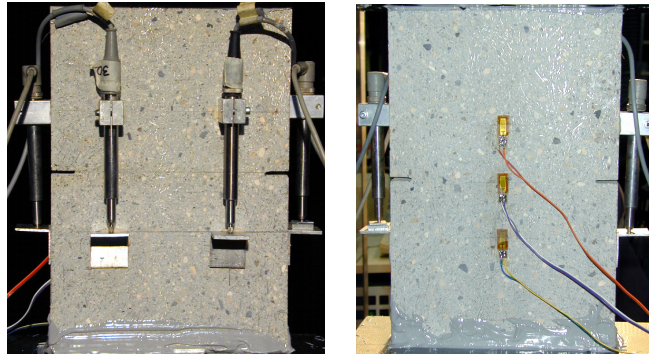
Bild 33 a - b: gekerbte Zugversuche; a) Probekörper (Masse in mm), b) Messeinrichtung



## VERSUCHSAUFBAU / VERSUCHSDURCHFÜHRUNG/ MESSEINRICHTUNG

Die Probe wird in die Halterung eingeklebt um mögliche Exzentrizitäten und Rotationen zu vermeiden. Der Versuch wird als Zugversuch mit beidseitig eingespanntem Probekörper durchgeführt.

Durch mehrmalige Vorbe- und -endlastung wird ein genau definierter Riss zwischen den Einkerbungen erzwungen. Die Vorbelastung wird mit 40 kN (entspricht 5 MPa) begonnen und bei jeder Stufe um 1 MPa gesteigert, bis die Zugfestigkeit der zementösen Matrix überschritten ist. Mit Hilfe des mittleren DMSs wird die Ausbildung des Risses überwacht. Die Probe wird anschliessend bis zum kompletten Auszug der Fasern weggesteuert mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0.08 mm/min belastet. Der Versuch wird mit zwei seitlich befestigten induktiven Wegaufnehmern gesteuert.

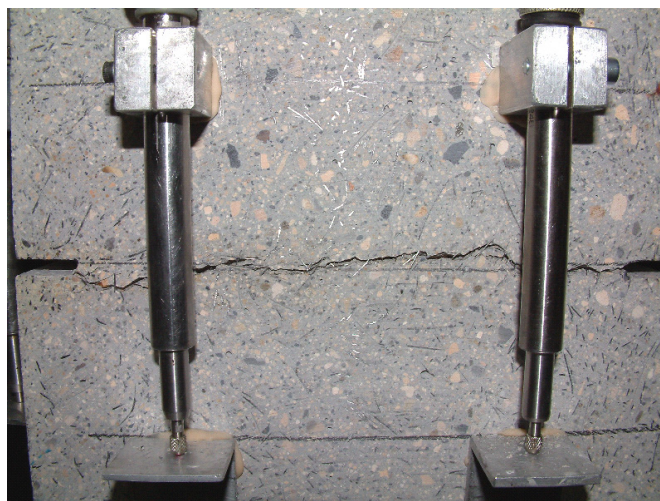


*Bild 34: Foto des Versuchsaufbaus*

Die Belastung sowie die Verformung werden kontinuierlich aufgezeichnet. Ergänzend wird mit 3 DMS die Rissentwicklung und die Verformung ausserhalb der Messzone überwacht (Bild 33b und Bild 34).

## ERGEBNISSE

Durch die mehrmalige Vorbelastung bildet sich ein klar definierter Riss zwischen den beiden Einkerbungen aus (Bild 35). Aufgrund der eingeschnürten Spannungstrajektorien im Bereich der Kerben, wird kein perfekter einachsiger Spannungszustand erzielt. Der Riss hat folglich eine geringe Tendenz von der direkten Verbindungslinie zwischen den Kerben abzuweichen (siehe Rissbilder im Anhang).



*Bild 35: Erzwungene Rissbildung zwischen den Kerben G15F3*

Zur Kontrolle der Rissbildung kann der mittlere DMS herangezogen werden, welcher zunächst die Hystereseschleife der Vorbelastung durchläuft, dann ab der Rissbildung (Riss der Matrix bei 9 MPa) eine starke Dehnung anzeigt und letztendlich zerreist

(Bild 36). Entsprechend zeigt der DMS ,oben' und ,unten' über den gesamten Versuchsverlauf ein konstantes E-Modul. Dies zeigt, dass die Probe ausserhalb des gekerbten Bereiches im ungerissenen Zustand bleibt. Es tritt hier folglich, keine Mehrfachrissbildung ein.

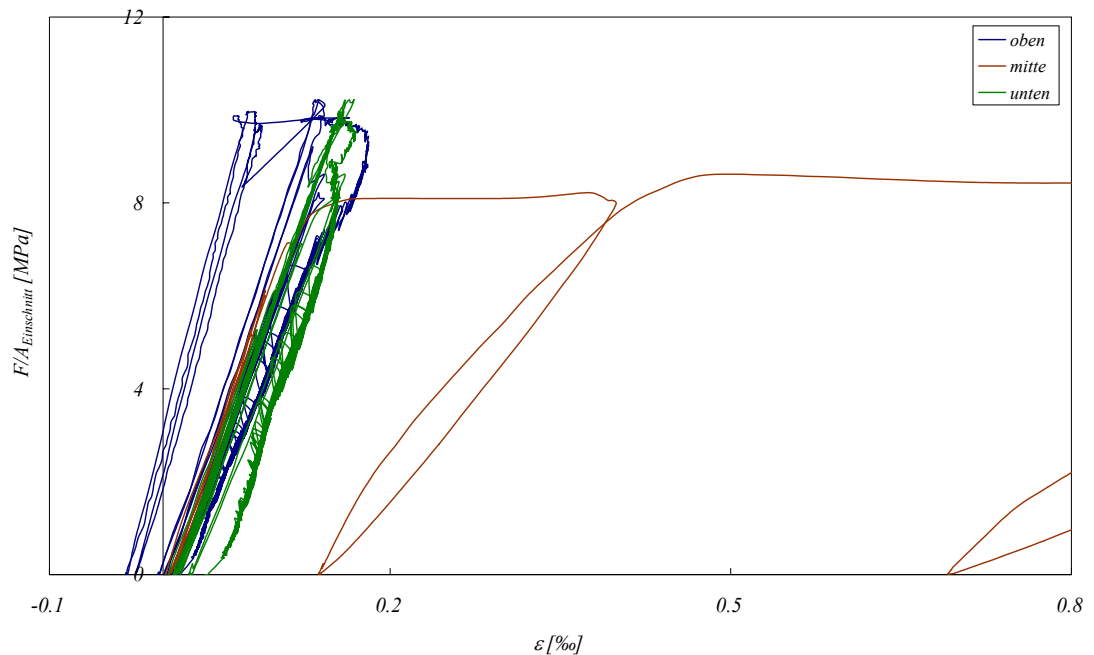


Bild 36: Spannungs – Dehnungskurve der DMS der Probe G15F1 – Rissbildung im Bereich des mittleren DMS

Bei näherer Betrachtung des ersten Bereichs der Spannungs – Verformungskurve der induktiven Wegaufnehmer erkennt man die Vorbelastungskurven (Bild 37). Es verringert sich die Steifigkeit, was das Entstehen des Makrorisses anzeigt. Im Bereich der Messzone addiert sich die Rissöffnung zur elastischen Verformung der Matrix.

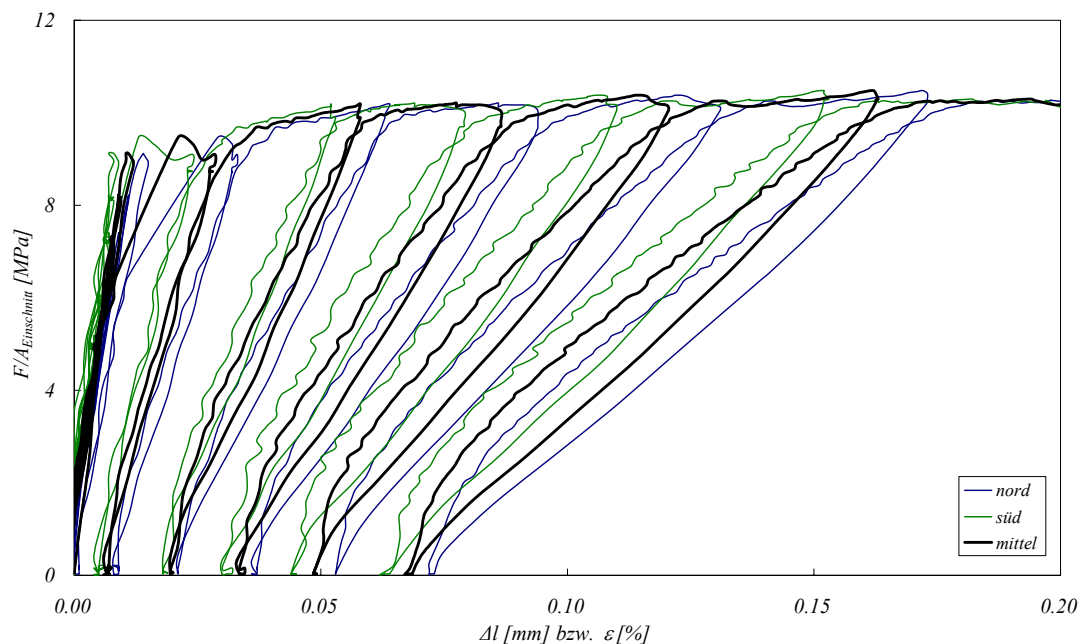


Bild 37: Spannungs – Verformungskurve des induktiven Wegaufnehmers, Probe G15F3 (Messlänge 100 mm)

Bei rund 10 MPa (Mittelwert im Einschnitt) erzielen die Proben ihre Zugfestigkeit (Bild 38). Die Matrix ist nun komplett getrennt und die Last wird von den Fasern übertragen. Bei weiterer Rissöffnung beginnen die Fasern auszureissen. Die Kraftaufnehmer zeigen in der Phase der Rissöffnung ein hyperbolisch entfestigendes

Verhalten. Der Verlauf der Spannung weist bei der Rissöffnung markante Sprünge auf, welche im Folgenden genauer analysiert werden.

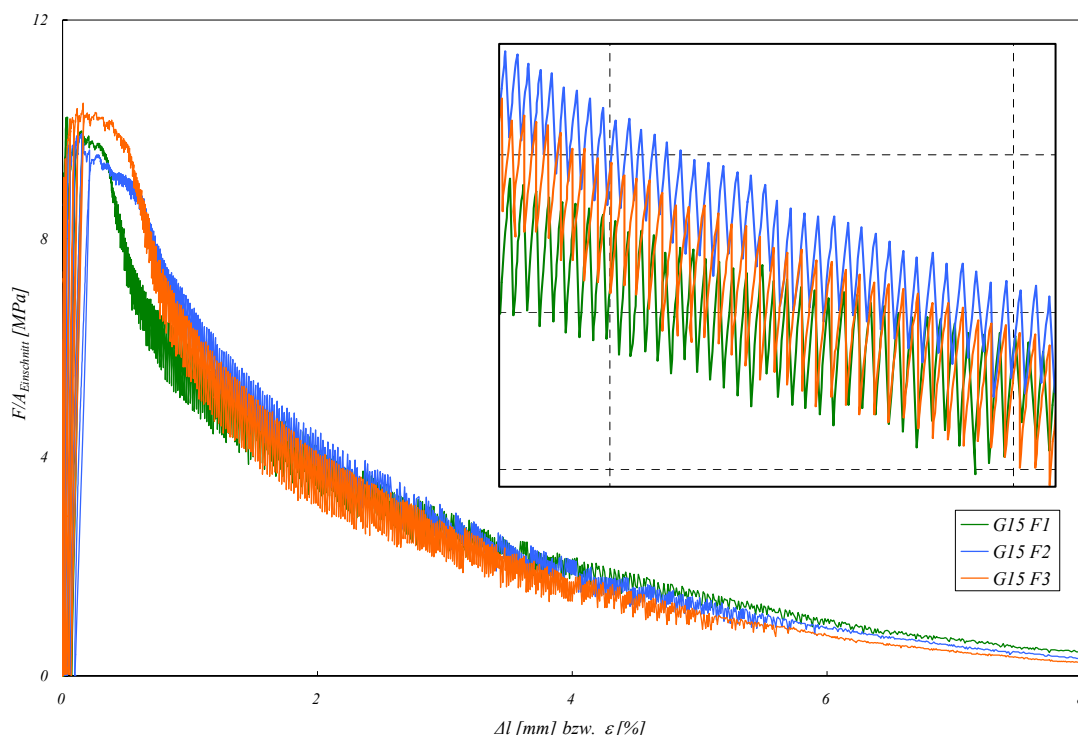


Bild 38: Spannungs – Verformungskurve der Faserausziehversuche (Mittelwert der induktiven Wegaufnehmer; Messlänge 100 mm); Vergrößerung der Spannungssprünge

In Tabelle 20 sind die Kennwerte der Versuche zusammengefasst:

	Zugfest. Matrix [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Dehnung bei $f_{ct}$ [‰]
<b>G15F1</b>	9.2	10.5	1.6
<b>G15F2</b>	9.0	10.0	1.6
<b>G15F3</b>	9.1	10.5	1.6
$\bar{x}$	9.1	10.3	1.6
<b>s</b>	0.1	0.3	0.0

Tabelle 20: Kennwerte des Faserausziehversuchs

#### ANALYSE DES FASERAUSREISSENS

Gleichzeitig mit jeder Spannungsspitze ist ein lautes Knacken, wie beim Reißen einer Gitarrenseite zu hören. Ebenfalls spürt man eine deutliche Erschütterung der Prüfmaschine. Betrachtet man anhand der einzelnen Messwerte den zeitlichen Verlauf der Spannungssprünge, so zeigt sich auch hier nach jeder Spannungsspitze ein abrupter Spannungssprung auf ein niedrigeres Spannungsniveau. Anschliessend steigt, bei dem weggesteuert gefahrenen Versuch, die Last über mehrere Messintervalle langsam wieder bis auf ein etwas niedrigeres Niveau an. Es wird vermutet, dass dieses Phänomen durch Ausreissen (Versagen des Haftverbundes) einzelner Fasern begründet ist. Gegen Ende des Versuchs, bei bereits sehr grosser Rissöffnung, geht das Knacken in ein Knirschen über.

Für die weitere Analyse des Nachbruchverhaltens bzw. des Faserausreissens, ist zunächst der elastische Anteil der Matrixverformung von der, über die Länge von 100 mm gemessenen Verformung zu subtrahieren. Für den Bereich neben dem Riss kann ein ungerissenes Verhalten angesetzt werden, da die Zugfestigkeit der Matrix neben der Einkerbung nie überschritten wird (Siehe hierzu auch Messung der DMS



,unten' und ,oben' Bild 36). Man erhält ein Spannungs–Rissöffnungsdiagramm (Bild 39).

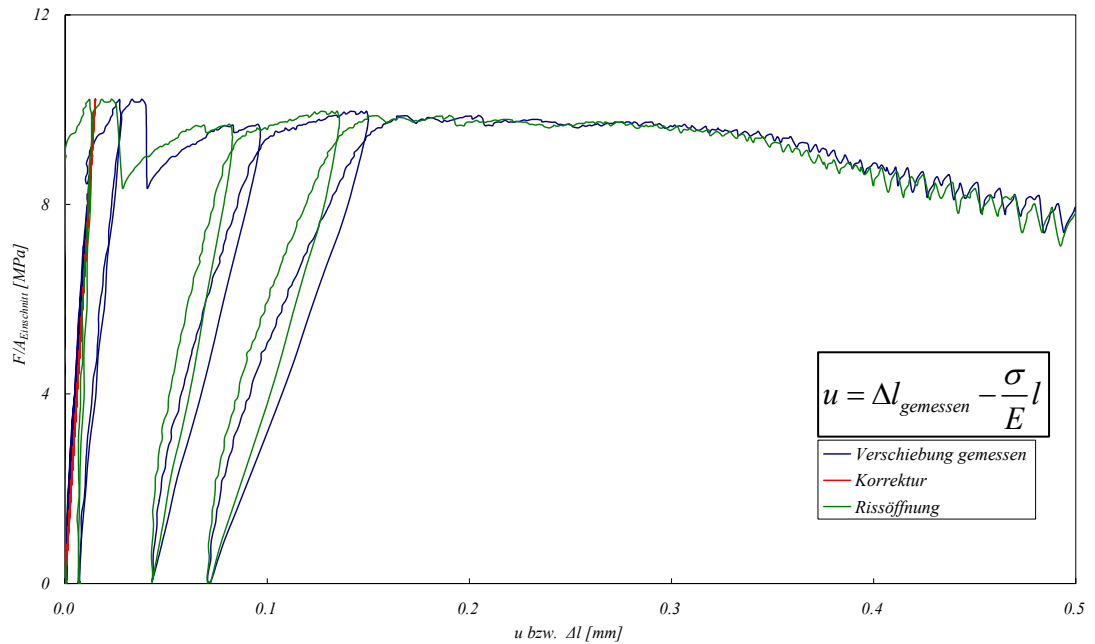


Bild 39: Herausrechnen der elastischen Verformung der Zementmatrix am Beispiel der Probe G15F1

Bild 40 zeigt die Analyse der Rissöffnung am Beispiel der Probe G15F3. Aus der Last – Rissöffnungskurve der Probe werden zunächst die einzelnen Spannungsspitzen ermittelt und ihr Auftreten in Abhängigkeit der Rissöffnung als Summenlinie aufgetragen. Die hier als ‚Sprunggrösse‘ bezeichnete Punkte stellen jeweils den Kraftunterschied von einem zum folgenden Maximum dar. Dieser Wert unterliegt starken Schwankungen, weshalb mit einer Ausgleichskurve eine Annäherung gemacht wurde. Die im Diagramm dargestellten diskreten Kraftstufen der Sprunggrösse ergeben sich aus der groben Auflösung der Kraftmessdose der Prüfmaschine.

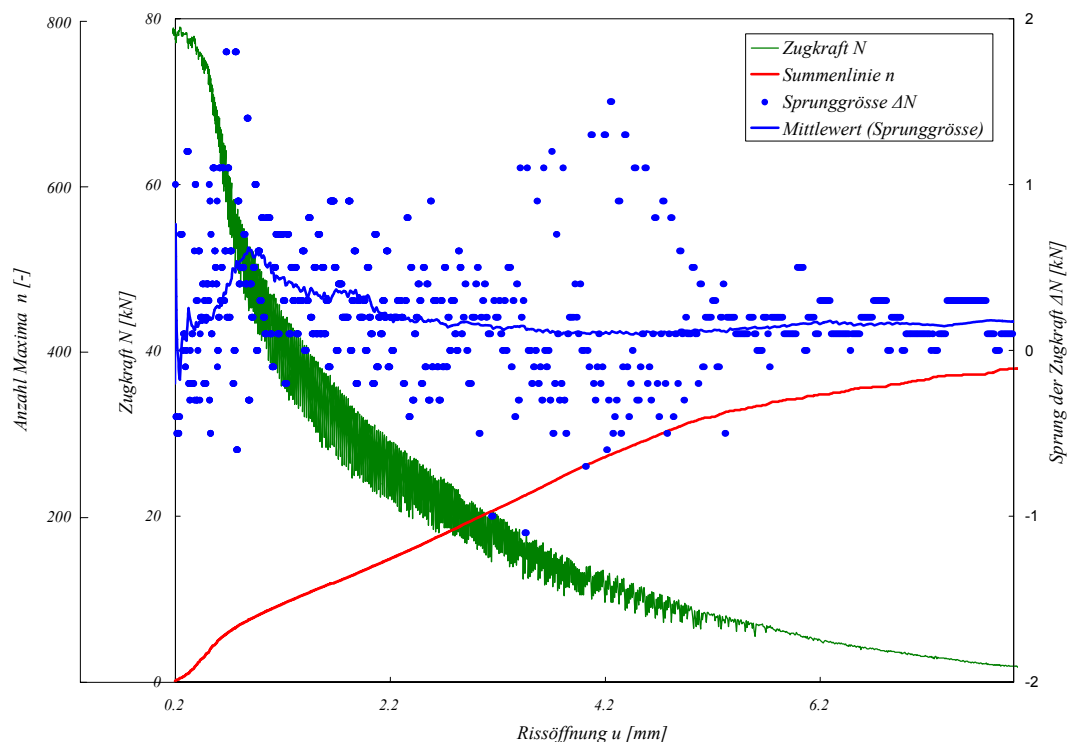


Bild 40: Analyse der Spannungssprünge der Probe G15F3

Überlagert man die Analysekurven der drei Prüfkörper lässt sich eine sehr gute Kohärenz zwischen den verschiedenen Probekörpern feststellen (Bild 41). Für den Verlauf der Summenlinie können folgende Feststellungen gemacht werden:

- Nach Überschreiten der Festigkeit treten bis zum vollständigen Versagen des Querschnittes rund 380 Spannungsspitzen / Faserausriss auf.
- In einer ersten Phase (Rissöffnung bis 0.6 mm) kommt es zu vielen Sprüngen pro mm Rissöffnung.
- In einer zweiten Phase (Rissöffnung 0.7 – 5 mm) stellt sich ein annähernd linearer Verlauf der Rissöffnung mit einer Steigung von 0.006 mm / Sprung ein. Das heisst, über einen grossen Bereich führt das Ausreissen einer Faser jeweils zu einer gleich grossen Rissöffnung.
- Gegen Ende flacht die Kurve ab, wobei hier eventuell die Auflösung der Messungen einen Einfluss hat.

Die Sprunghöhe von einem Maximum zum nächsten weist ebenfalls 3 Bereiche auf:

- Man beobachtet zunächst ein Ansteigen der Sprunghöhe einzelner Sprünge auf bis zu 1 kN im Bereich einer Rissöffnung von 1 mm.
- Anschliessend fällt die Sprunghöhe wieder ab
- Zum Schluss steigt sie erneut an, wobei dies eventuell aber durch Auflösungsprobleme bedingt ist.

Die Grösse der Sprünge unterliegt starken Schwankungen, sodass Angaben über den Kraftsprung nur als Mittelwert über einen grösseren Bereich möglich sind. So liegt zu Beginn des Faserausreissens (0.2 bis 0.7 mm Rissöffnung) der Mittelwert der Faserausrisskraft bei 0.25 kN / Faser (70 Fasern bei einer normalisierten Spannungsdifferenz von 0.23 und einer mittleren Festigkeit von 75 kN). Im Bereich der grössten Ausrisskräfte, zwischen 0.7 und 1.2 mm Rissöffnung, werden 30 Fasern mit einer mittleren Kraft von 0.4 kN ausgerissen. Im weiteren Verlauf bei grösserer Rissöffnung (2.7 - 3.2 mm) beträgt die Ausreisskraft nur mehr 0.12 kN. Diese rechnerisch ermittelten Werte werden auch sehr gut von der Trendlinie wiedergegeben.

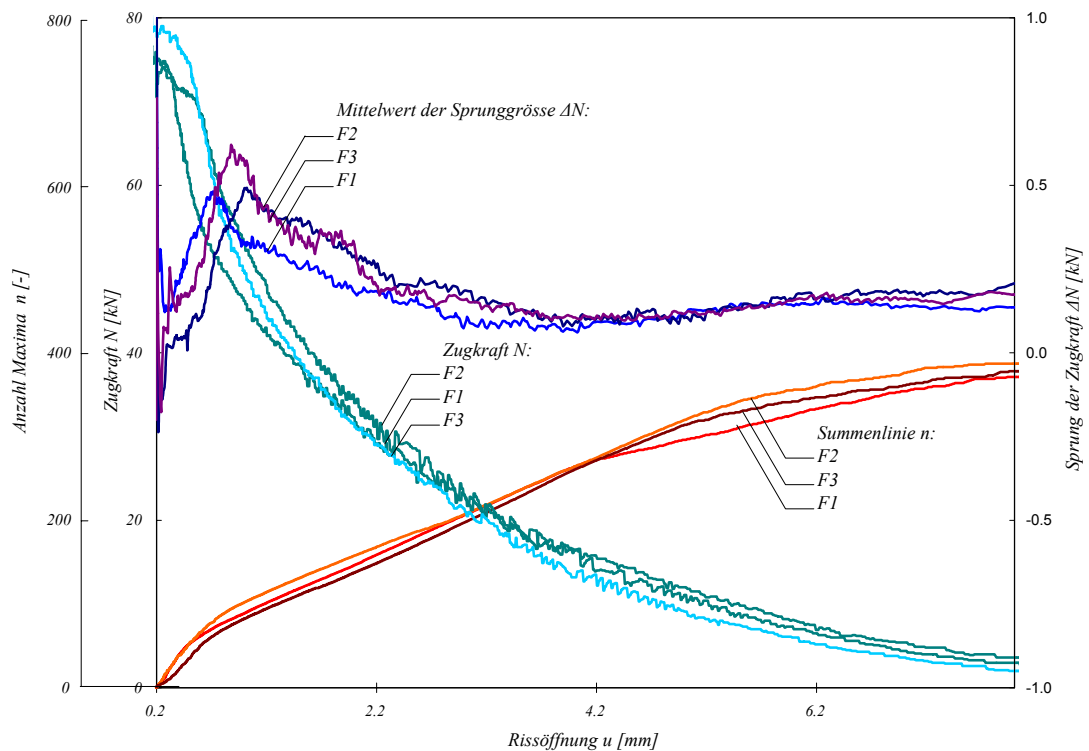


Bild 41: Spannungssprunganalyse im Vergleich aller Proben

Basierend auf den beobachteten Phänomenen lassen sich Überlegungen zum Ausreissvorgang anstellen. Skizze Bild 42a/b zeigt schematisch die mögliche Lage und Orientierung der Fasern bezogen auf den Riss. Die Lage hat insbesondere einen Einfluss auf die Verankerungslänge und somit auf die Verbundfestigkeit der Faser (Versagen durch Faserauszug vorausgesetzt). Die Orientierung im dreidimensionalen Raum beeinflusst hingegen die Aktivierung der Fasern und führt eventuell zu zusätzlicher Reibung am Faseraustrittspunkt.

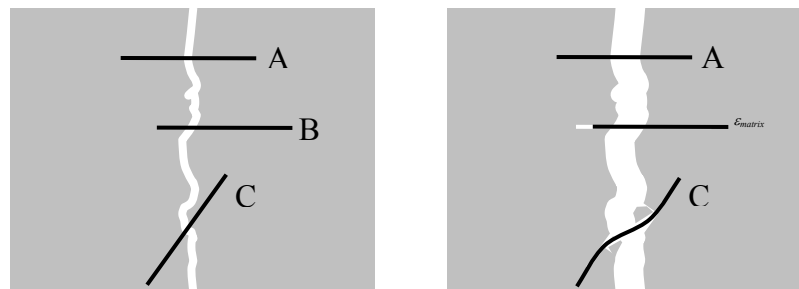


Bild 42 a/b: Mögliche Lage und Orientierung von Fasern zum Riss; a) Initial-Riss der Matrix b) vorgeschrittene Rissöffnung mit Ausziehen schlecht verankerter Fasern bzw. Abplatzungen des Betons

Nach Reißen der Zementmatrix werden zunächst annähernd senkrecht zum Riss liegende Fasern aktiviert. Es werden als Erstes die schlecht verankerten (asymmetrisch zum Riss liegenden) Fasern ausgerissen (Faser Typ B). Dies zeigt sich im Versuch durch eine erste Phase mit relativ geringen Ausziehfestigkeiten. Folgend versagen auch die gut verankerten senkrechten Fasern mit sehr grossen Spannungssprüngen pro Faser (Faser Typ A). Bei weiterer Rissöffnung werden auch diagonal orientierte Fasern aktiviert. Diese müssen zuerst gestreckt werden, wobei es mitunter zum Abplatzen der Zementmatrix im Bereich des Faseraustrittspunktes kommt (Faser Typ C). Akustisch machen sich diese Abplatzungen durch ein knirschendes Geräusch bemerkbar. Die Ausreisskraft dieser Fasern ist niedriger, da sich durch das Abplatzen die Verankerungslänge der Faser verringert.

Auch nachdem eine Faser durch Überschreiten der Haftzugspannung ‚ausgerissen‘ ist, kann sie weiterhin durch Gleitverbund zur Kraftübertragung beitragen. Durch die glatte Oberfläche der Fasern können hierbei aber nur sehr geringe Verbundspannungen übertragen werden.

Beim UHFB versagen die Fasern ausschliesslich durch Überschreiten der Verbundspannung zwischen Faser und Matrix. An den zerrissenen Prüfkörpern ist auch eindeutig zu erkennen, dass bei keiner der Fasern die Zugfestigkeit des Stahls überschritten wurde und es zum Abriss der Faser gekommen ist. Deutlich sind auch die leeren Faserkanäle zu erkennen, welche nach dem Auszug der Fasern in der Matrix vorhanden sind (Bild 43).



*Bild 43: Durch Verbundversagen aufgerissene Fasern.  
Die Zugfestigkeit der Fasern wird nicht erreicht.*

Die beobachteten Phänomene zeigen, dass für das Verbundverhalten zwischen Faser und Matrix bei UHFB der Haftreibunganteil gegenüber dem Gleitreibungsanteil überwiegt. Im Vergleich zu normalen Faserbeton führt der hohe Anteil an Mikrosilica zu einer sehr guten Haftung mit den Fasern. Es sind deshalb auch keine Hacken an den Fasern nötig, welche ihrerseits in erster Linie auch nur den Gleitverbund verbessern.

#### VERBUNDSPANNUNG

Im Folgenden wird versucht durch Rückrechnung aus den Versuchsergebnissen die Verbundspannung zwischen Matrix und Faser ermittelt.

Zunächst ist hierfür die Anzahl der rissquerenden Fasern zu bestimmen. Dies kann durch Auszählen, durch Ermittlung aus den Spannungsspitzen der Messkurve oder Hochrechnung aus der Faserdosierung erfolgen (Tabelle 21).

- Bei der Auszählung werden alle Fasern berücksichtigt, welche auf einer der beiden Seiten des Rissufers liegen und mehr als 3 mm herausstehen.
- Die Anzahl der Spannungssprünge wurde bereits oben bei der Analyse der Spannungsspitzen ermittelt.
- Aus dem Faseranteil von  $\rho_f = 2.5$  vol. % ergibt sich nach Marti / Pfyl [7], [8] mit

$$n_f = \frac{3}{8} \rho_f \cdot \frac{A_{Riss}}{A_{Faser}}$$

für die das Rissufer durchdringenden Fasern eine Anzahl von  $n_f = 1061$ .

	gezählt	Anzahl Peaks	berechnet
G15F1	690	387	1061
G15F2	900	371	
G15F3	760	378	
Mittel	783	379	1061

Tabelle 21: Ermittlung der Anzahl der rissquerenden Fasern mit unterschiedlichen Methoden

Der Unterschied zwischen der berechneten und gezählten Faseranzahl ist darauf zurückzuführen, dass bei der Berechnung jede auch nur minimal herausstehende Faser berücksichtigt wird. Der Unterschied von rund 25% entspricht den  $\frac{3 \text{ mm} \cdot 2}{20 \text{ mm}} = 30\%$  beim Zählen vernachlässigten Fasern (kürzer 3 mm).

Die Diskrepanz zu den beobachteten Spannungssprüngen ergibt sich aus der Tatsache, dass nur ein gewisser Teil der Fasern (hier 50%) ausreichend gut verankert ist, um in der Messkurve beim Ausreißen eine klare Spannungsspitze zu erzeugen.

Berechnet man aus den oben ermittelten rissüberbrückenden Fasern eine mittlere Ausziehkraft pro Faser, ergeben sich für die unterschiedlichen Methoden folgende Werte:

	max Zugkraft	mittlere Kraft / Faser		
		gezählt	Anzahl Peaks	berechnet
	[KN]	[N]	[N]	[N]
G15F1	80.3	116.4	207.5	75.7
G15F2	77.1	85.7	207.8	72.7
G15F3	80.3	105.7	212.4	75.7
Mittel	79	103	209	75

Tabelle 22: Mittlere Zugkraft pro Faser ermittelt für die unterschiedlichen Faseranzahlen (siehe Tabelle 21)

## 6 BIEGEVERSUCH

### 6.1 VIER – PUNKT BIEGEVERSUCH

Der Biegeversuch ist im Vergleich zum Zugversuch ein relativ einfach durchzuführender Versuch. Indirekt lassen sich über ihn die Zugfestigkeit eines Werkstoffes bestimmen. Er wird deshalb gerne als Ersatz zur Bestimmung der Zugfestigkeit benutzt. Um aus der Biegezugfestigkeit des Prüfkörpers die Zugfestigkeit des Materials zu ermitteln, wird ein Modell benötigt, welches die Spannungs- Dehnungsbeziehungen im Biegequerschnitt beschreibt. Dieses gilt es für die besonderen Eigenschaften des UHFB zu entwickeln und mit Hilfe der hier durchgeführten Versuche zu überprüfen.

#### PROBEKÖRPER UND VERSUCHSAUFBAU

Es werden 3 Probekörper mit den Dimensionen 100 x 100 x 400 mm belastet. Die Proben werden 90 Grad gekippt auf den seitlichen Flächen belastet, um den Einfluss der Inhomogenität, die sich durch den Betoniervorgang ergeben, zu verringern.

Die Versuche werden als 4 Punkt Biegeversuch durchgeführt, um das Versagen nicht an einer diskreten Stelle zu forcieren, sondern konstante Belastungsbedingungen über einen grösseren Bereich zu erhalten.

Die Auflager des Versuchsaufbaus haben einen Abstand von 300 mm und sind als verschiebbliche Lager ausgebildet. Die Krafteinleitung erfolgt über zwei in beide

Richtungen gelenkig gelagerte Elemente mit einem Achsabstand von 100 mm. Diese Lasteinleitungselemente bilden das unverschiebbliche Auflager (Bild 44).

Der Versuch entspricht in seiner Konfiguration dem von der Association de Génie Civil und der SETRA [10] vorgeschlagenen Versuch.

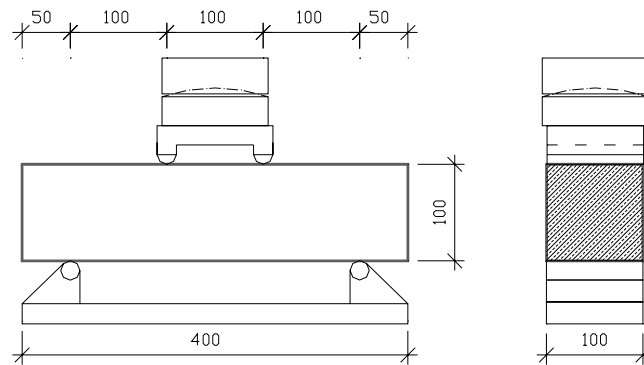


Bild 44: Versuchsaufbau Biegeversuch

#### MESSEINRICHTUNG

Um möglichst viele Informationen über das Verformungsverhalten des Biegebalkens zu erhalten, werden mehrere teils redundante Messsysteme eingesetzt (Bild 45 und Bild 46a/b).

Mittels eines an einer Messbrücke befestigten induktiven Wegaufnehmers wird die Durchbiegung in der Mitte des Balkens bestimmt. Zwei horizontale Wegaufnehmer registrieren die Verformung der Randfasern im Bereich der Messzone ( $l = 100$  mm). Mit je einem Inklinometer wird die Verdrehung des Querschnitts an den Rändern der Messzone bestimmt. Zur Kontrolle und um eine geometrisch feinere Auflösung der Verformungen zu erhalten, werden mit einem Videoextensiometer die Deformationen in 4 Schnitten (4 x 4 Punkte Raster) bestimmt.

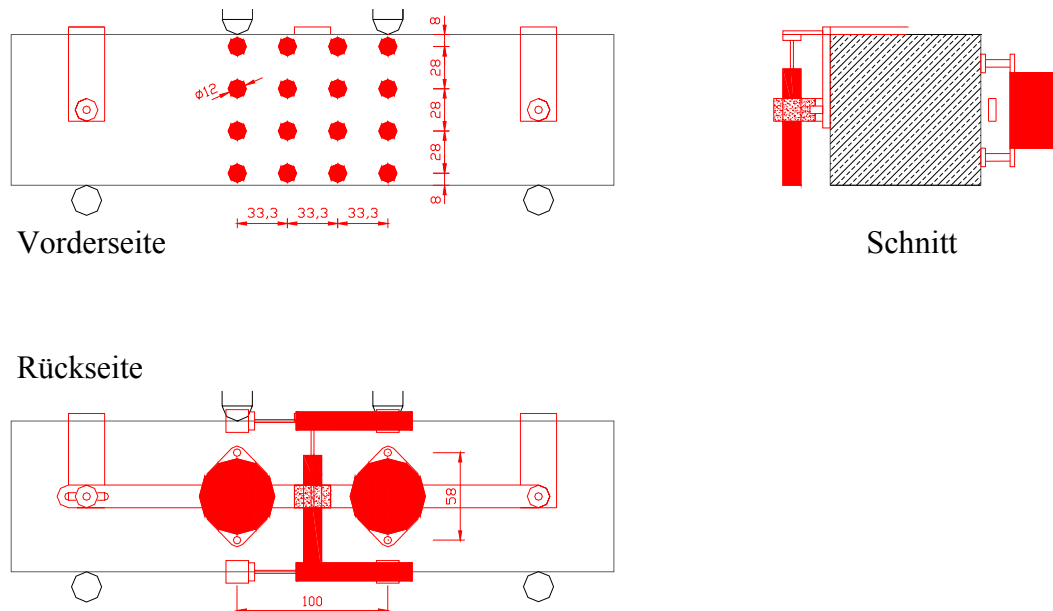


Bild 45: Messeinrichtung des Biegeversuchs

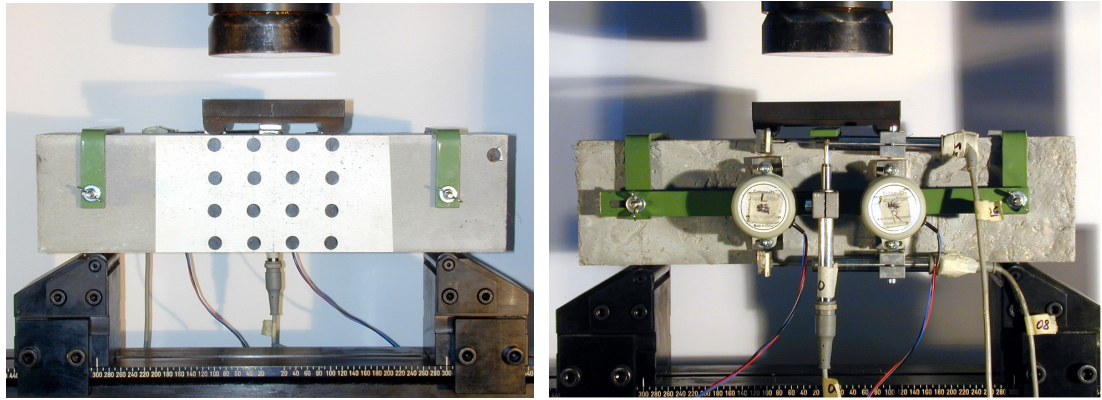


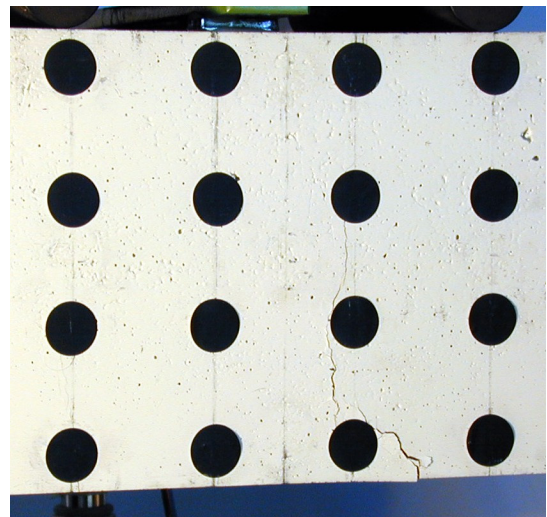
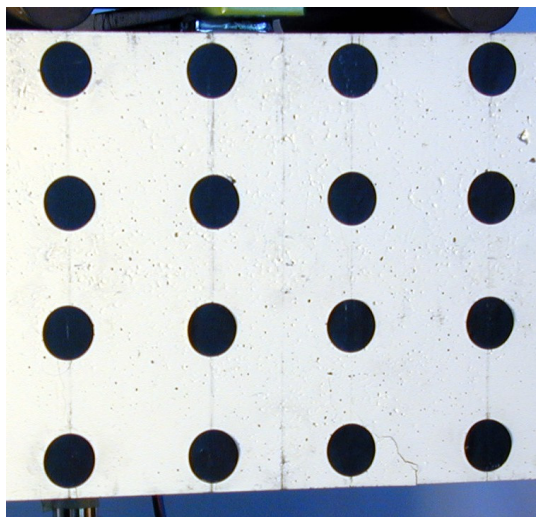
Bild 46 a/b: Foto des Versuchsaufbaus Vorder- und Rückseite

#### VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die Versuche werden weggesteuert mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0.5 mm/min gefahren. Die Aufzeichnung der Belastung (maschineninterne Kraftmessdose) und der Verformungen erfolgt kontinuierlich. Der Videoextensiomter arbeitet als eigenständige Messeinheit, in die legendlich die Pressenkraft als externer Messwert eingespeist wird.

#### ERGEBNISSE

Zu Beginn ist im Bereich des konstanten Biegemomentes auf der Zugseite des Balkens, genauso wie beim zentrischen Zugversuch, eine Multirissbildung zu erkennen. Es kommt relativ schnell zu einer Lokalisierung der Rissbildung. Der Riss wächst stark gewunden in Richtung der Druckzone des Balkens. Dies bedeutet, dass die Rissbildung entlang des Bereiches der geringsten Festigkeit (Schwachstellen im Querschnitt) stattfindet (Bild 47a - d).





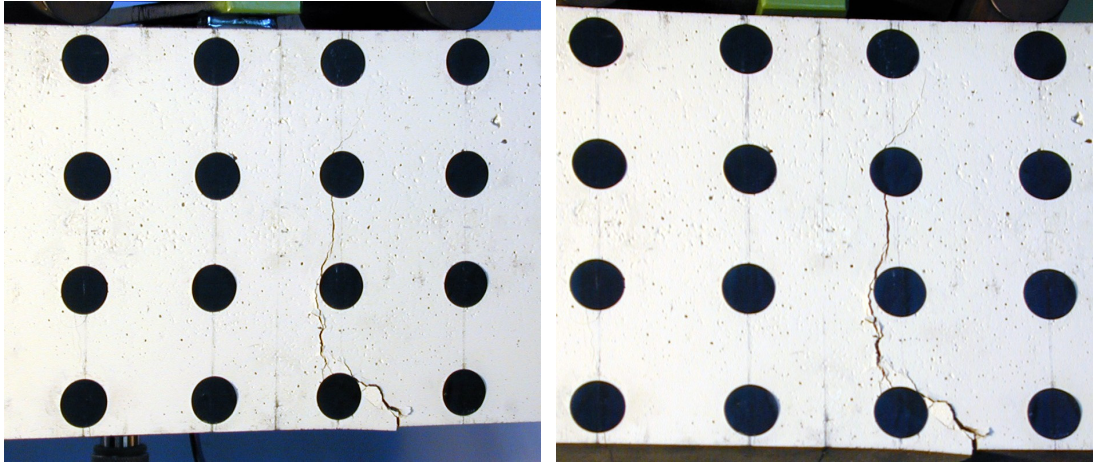


Bild 47 a-d: Risswachstum bei der Biegezugprobe G14P14

Bei weit vorgeschrittener Rissöffnung beträgt die Höhe der Druckzone nur mehr wenige Millimeter. Auf der Druckseite der Probe kommt es zu leichten Abplatzungen. Die Druckzone ist plastisch verformt um die Winkelverdrehung zwischen den Rissufern zu überbrücken (Bild 48a/b).

Bei der Rissöffnung sind dieselben knackenden Geräusche zu hören, wie sie bei den zentrischen Zugversuchen beobachtet wurden.

Die Rissbilder aller Proben sind im Anhang zusammengestellt.

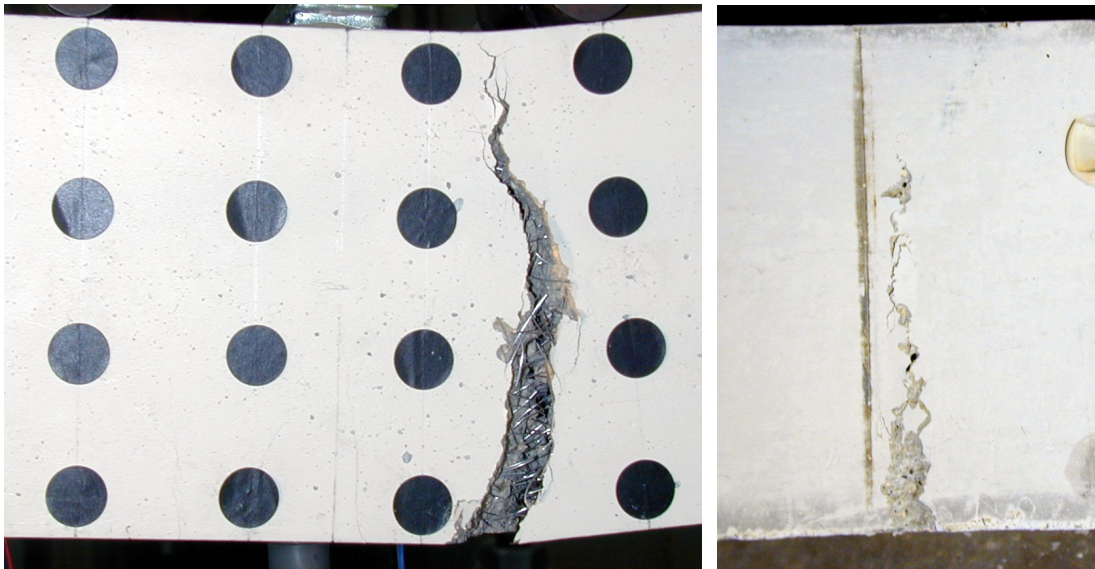


Bild 48 a/b: Abgeschlossene Rissöffnung und Abplatzen des Betons in der Druckzone

Aus dem Biegeversuch lässt sich mit den in Bild 49 dargestellten Beziehungen die Biegezugspannung  $f_{ct,flex}$  ermitteln. Die Biegezugspannung ist die Zugspannung in der Randfaser unter der Annahme einer linearen Spannungsverteilung im Querschnitt.



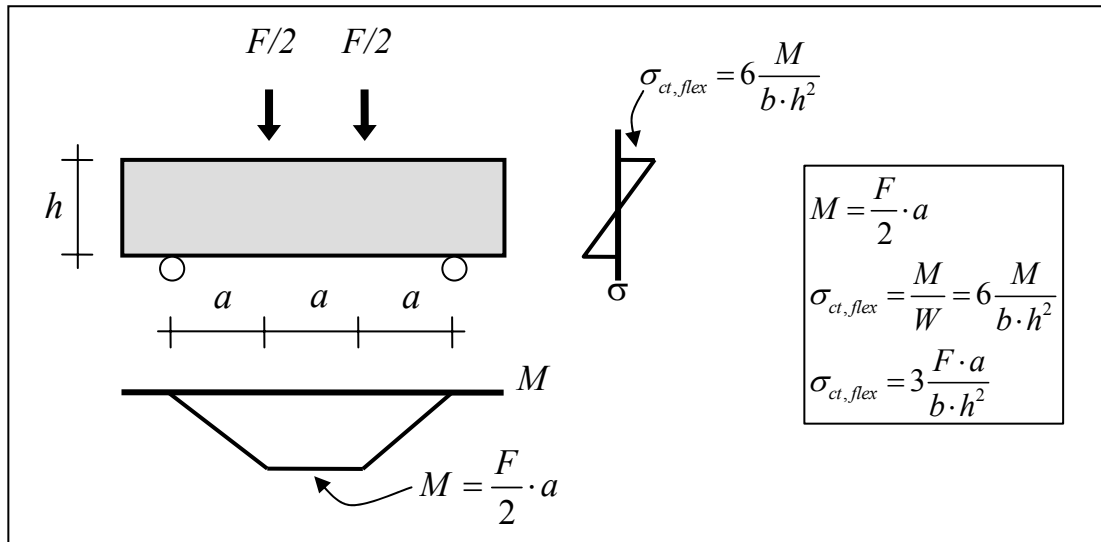


Bild 49: Beziehung von Last, Biegebeanspruchung und linearen Spannungsverteilung beim Vierpunkt Biegeversuch

Im gerissenen Zustand ist die oben aufgeführte Formulierung die Biegezugspannung physikalische nicht mehr korrekt, dennoch wird die Biegezugfestigkeit sehr häufig als Materialkennwert im Ersatz für die axiale Zugfestigkeit benutzt. Axiale Zugversuche sind sehr viel aufwendiger zu realisieren und es ist sehr schwierig eine wirklich zentrierte Krafteinleitung sicherzustellen. Mit dem Biegezugversuch können sehr einfach Vergleichswerte für verschiedene UHFBe ermittelt werden. Mit Hilfe von Modellen bzw. einfach ermittelten empirischen Umrechnungsfaktoren ist es auch möglich aus der Biegezugfestigkeit auf eine axiale Zugfestigkeit zu schliessen. Für den hier durchgeführten Versuchstyp und das verwendete Material kann ein empirischer Umrechnungsfaktor von  $f_{ct} = 0.3 f_{ct,flex}$  angegeben werden.

Bild 50 zeigt den Verlauf der Belastung, angegeben als nominelle Biegezugspannung aufgetragen über die Durchbiegung. In einer ersten linear elastischen Phase ist der Beton ungerissen. Bei rund 85% der Festigkeit kommt es zur Rissbildung, welche sich im Diagramm durch Abflachen der Kurve widerspiegelt. Beim Erreichen der Festigkeit scheint es, dass sich genauso wie beim axialen Zugversagen ein gewisser Bereich mit annähernd gleich bleibender Spannung einstellt (siehe Kapitel 5). Dies ist aber aufgrund grosser Sprünge in diesem Bereich, aus nur drei getesteten Proben nicht abschliessend zu beurteilen. Die Biegezugspannung fällt im Bereich der Rissöffnung parabolisch ab. Auch hier kann eine Parallele zu dem bei den Zugversuchen beobachteten Verhalten erkannt werden.

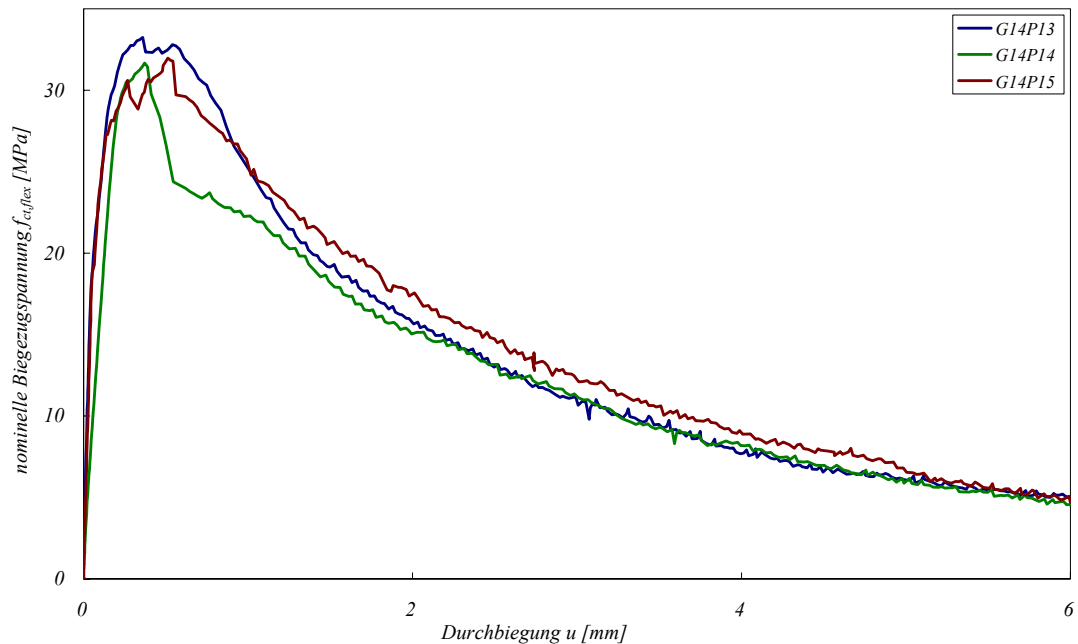


Bild 50: Biegezug – Durchbiegungsdiagramm der Proben G14P13-15

Die Kennwerte der Biegeversuche sind in Tabelle 23 zusammengefasst.

	$M_{\max}$ [kNm]	$f_{ct,flex}$ [MPa]	$u$ bei $F_{\max}$ [mm]
<b>G14P13</b>	5.53	33.2	0.36
<b>G14P14</b>	5.23	31.4	0.37
<b>G14P15</b>	5.30	31.8	0.52
<b>Mittel</b>	5.36	32.1	0.4

Tabelle 23: Zusammenfassung der Messwerte der Biegeversuche

#### WEITERFÜHRENDE AUSWERTUNGEN

Für eine weiterführende Auswertung der Biegeversuche wurden, wie einleitend beschrieben, zusätzliche Messsysteme angebracht. Bevor eine weitere Auswertung durchgeführt werden kann, gilt es zunächst die Kohärenz der Messwerte zu überprüfen und die Aussagekraft der Messungen zu diskutieren.

Wie aus den Rissbildern (siehe Anhang) zu sehen ist, hat sich bei G14P13 der Riss ausserhalb der Messzone ausgebildet, folglich sind Betrachtungen zu Längsverformungen bei dieser Probe nicht möglich.

Die Inklinometer liefern aufgrund eines technischen Defektes nur bei der Probe G14P15 korrekte Messwerte. Die fehlenden Werte können aufgrund der redundanten Messsysteme aus den durchwegs guten Ergebnissen der Videoextensiometrie ermittelt werden.

Bei Probe G14P15 entsteht der Riss genau zwischen zwei Messschnitten der Videoextensiometrie (Bild 51). Diese Messreihe eignet sich somit gut für eine genaue Analyse der Rissöffnung. Das über das Bild gelegte Verschiebungsfeld zeigt die Verschiebung der einzelnen Punkte, wobei die oberen Lasteinleitungspunkte unverschieblich gelagert sind.

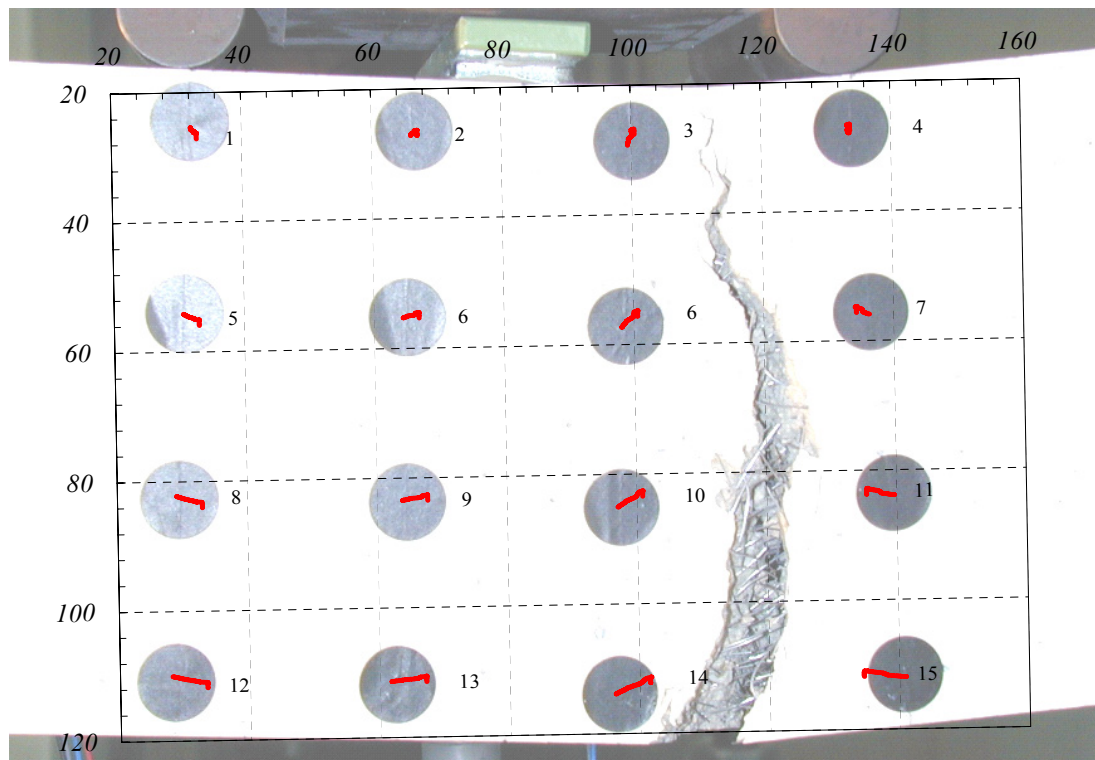


Bild 51: Verschiebungsfeld der Messpunkte auf dem Probekörper G14P15

Die Kohärenz zwischen den Messungen der Wegaufnehmer auf den Randfasern, den Inklinometern und der Videoextensometrie kann an einem Last – Rotationsdiagramm überprüft werden. Die Rotation ist hier der gemeinsame Wert, welcher sich aus allen Messgeräten ermitteln lässt.

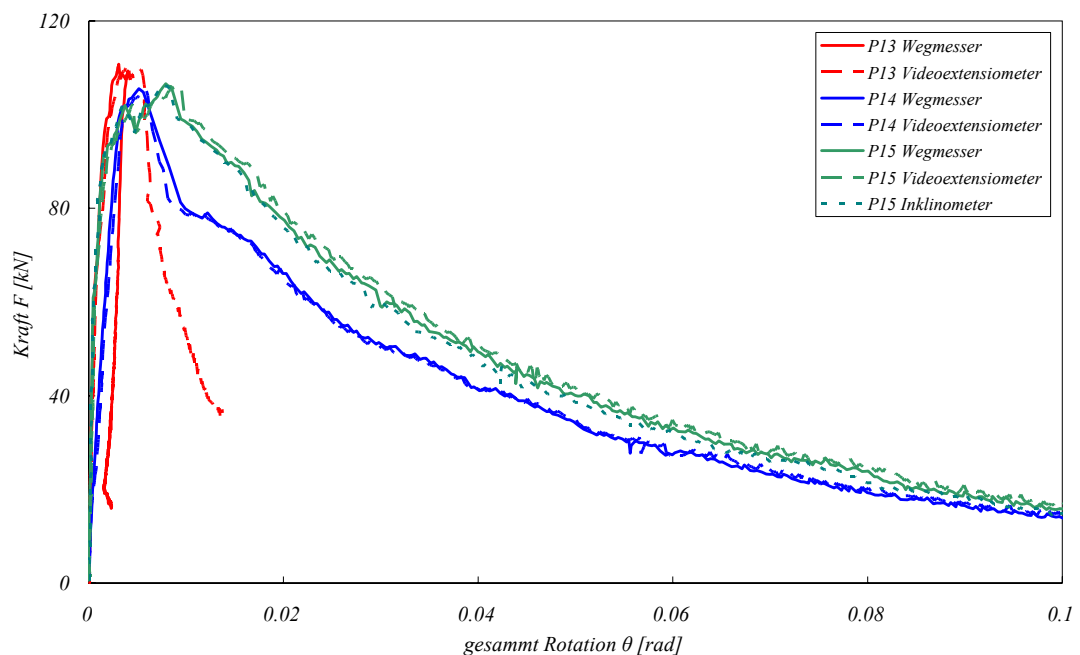


Bild 52: Vergleich der verschiedenen Messsysteme auf Basis eines Belastung - Rotationsdiagramms als gemeinsame Größe aller Messsysteme

Die Messwerte aller drei Messsysteme stimmen für die Probe G14P15 gut überein. Auch bei der Probe G14P14 ist die Kohärenz zwischen der Videoextensometrie und der Messung der Randfaser sehr gut. Kleine Abweichungen der verschiedenen Messsysteme können sich einerseits durch die unterschiedliche Verformung auf der Rück- und der Vorderseite der Probe ergeben oder bei Montage auf der gleichen Seite der Probe auch durch die unterschiedliche Lage der Montagepunkte. An der

Kurve der Probe G14P13 zeigt sich, dass hier die Rissbildung ausserhalb des Messbereichs eingetreten ist.

Mit den überprüften Messwerten kann als weitere Auswertung die Rotation zwischen den Messschnitten bzw. die Lage der Nullachse untersucht werden. Bild 53 zeigt die geometrischen Zusammenhänge, die sich hierfür am Biegebalken ergeben. Bezüglich der Krümmung kann nach Eintritt der Rissbildung nur mehr von einer, über einen bestimmten Bereich gemittelten Krümmung gesprochen werden. Die Verdrehung konzentriert sich in Realität auf den Riss zuzüglich einer elastischen Krümmung des restlichen Balkens.

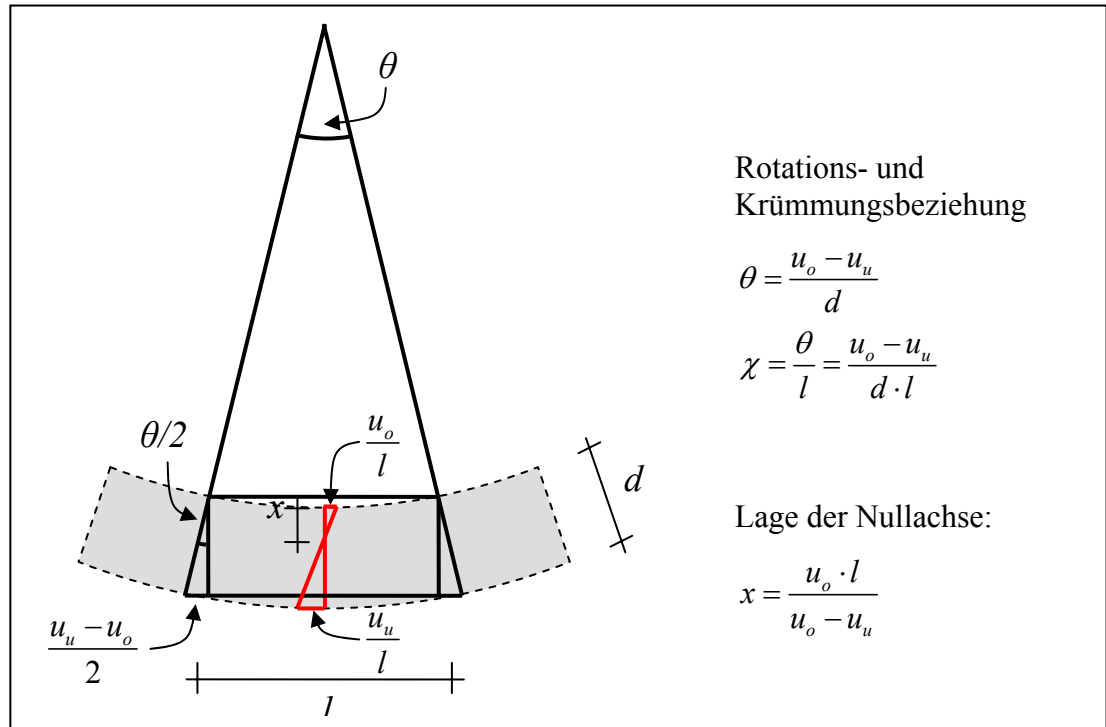


Bild 53: Geometrische Zusammenhänge zwischen der Verformung der Randfasern und der Rotation bzw. der Lage der Nullachse des Biegebalkens.

Aus den Messwerten der Randfaserwegaufnahme ergibt sich für die Biegebalken folgende Momenten – Krümmungsbeziehung (Bild 54). Die mittlere Krümmung ist hierbei auf eine Messlänge von 100 mm bezogen.

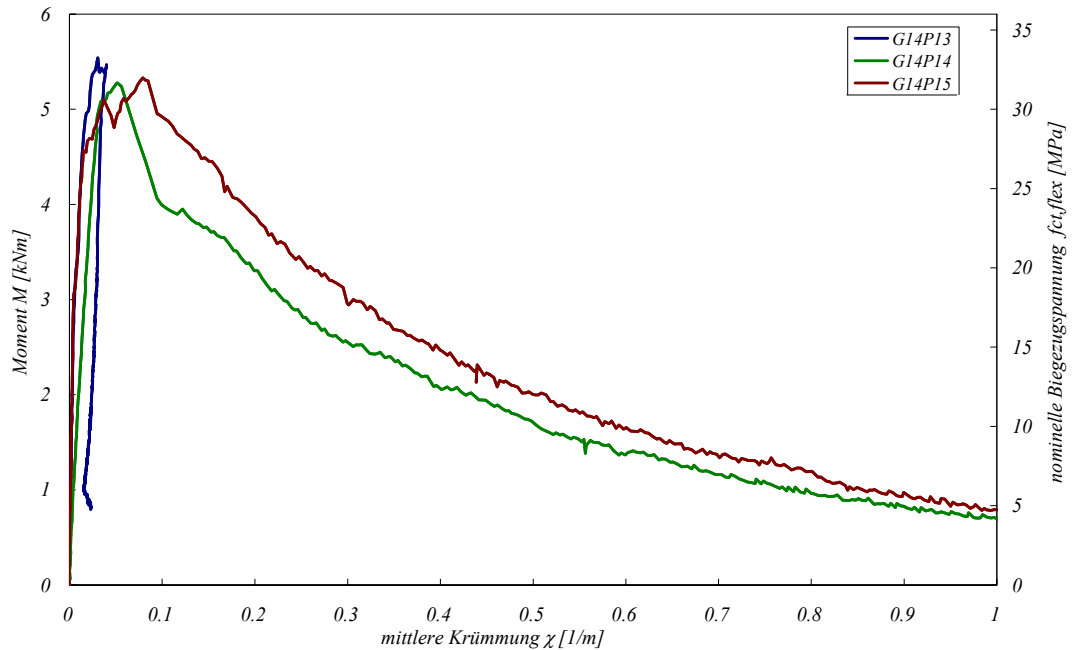


Bild 54: Momenten – Krümmungsdiagramm bzw. Biegezug – Krümmungsdiagramm; bezogen auf eine mittlere Krümmung bei einer Messlänge von 100 mm

Aufgrund des dichten Messpunktrasters der Videoextensiometrie ist es möglich die Vorgänge in der Nähe des Risses genauer zu untersuchen. Bei Probe G14P15 liegt der Riss annähernd mittig zwischen 2 Messschnitten. Hiermit lässt sich ein Vergleich für verschieden lange Messbereiche erstellen. Bild 55 zeigt die relative Rotation der Messschnitte in Abhängigkeit des Momentes für eine Messlänge von 100 und von 33 mm.

Unter der Annahme, dass die Matrix neben dem Riss dieselbe elastische Krümmung wie die ungerissenen Bereiche im Messfeld von 100 mm aufweist, kann man den Anteil aus der Krümmung der Matrix im Messfeld 33 mm zu

$$\theta_{\text{elast},3.3\text{cm}} = \frac{\theta_{10\text{cm}} - \theta_{3.3\text{cm}}}{2}$$

ermittelt. Der Verdrehungswinkel im Riss ergibt sich folglich aus:

$$\theta_{\text{Riss}} = \theta_{3.3\text{cm}} - \theta_{\text{elast},3.3\text{cm}} = \theta_{3.3\text{cm}} - \frac{\theta_{10\text{cm}} - \theta_{3.3\text{cm}}}{2} = \frac{3\theta_{3.3\text{cm}} - \theta_{10\text{cm}}}{2}$$

Die so ermittelte Kurve ist ebenfalls als „Verdrehungswinkel im Riss“ in Bild 55 eingetragen. Bei dieser Betrachtung ist zu beachten, dass die Multirissbildung nicht explizit berücksichtigt wird. Sie fällt, da sie sich über den gesamten Messbereich verteilt, dem elastischen Anteil zu.

Betrachtet man die Kurve, so ist zunächst eine rein elastische Verdrehung festzustellen. Die Rotation bei 100 mm Messlänge ist annähernd dreimal so gross wie die bei 33 mm Messlänge. Die Rotation durch Rissöffnung ist bis auf kleine Messungenauigkeiten annähernd null. Im weiteren Verlauf entsteht infolge der Rissbildung allmählich eine Rotation im Riss. Bei Maximallast sind die Kurven der beiden Messbereiche am weitesten von einander entfernt. Aufgrund des grossen Momentes ist hier auch die elastische Rotation am grössten. Mit zunehmender Rissöffnung nimmt das Moment ab, entsprechend wird die elastische Rotation immer kleiner, bis schlussendlich bei weit fortgeschrittener Rissöffnung nur mehr eine Rotation im Riss vorliegt. Die drei Kurven fallen hier aufeinander.

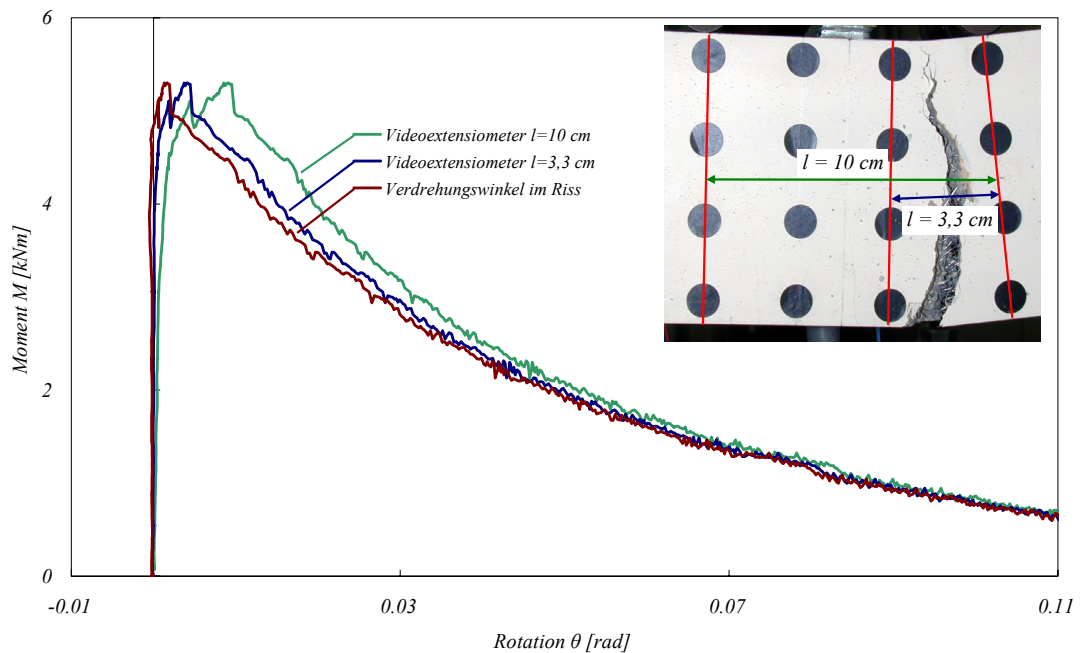


Bild 55: Einfluss verschiedener Messlängen, Analyse der Rotation im Riss (Versuchskörper G14P15)

Kennt man die Verformung der Randfasern bzw. die Rotation der Schnitte, so kann hieraus auch die Lage des Spannungsnullpunktes bestimmt werden. Die geometrischen Zusammenhänge sind in Bild 53 dargestellt. Bild 56 zeigt die Position der Nullachse aufgetragen gegenüber der mittleren Krümmung. Die Lage der Nulllinie wird hierbei durch die Höhe  $x$  der Druckzone ausgedrückt.

Bei sehr kleiner Krümmung befindet sich der Querschnitt im ungerissenen Bereich, die Nullachse liegt entsprechend bei der halben Höhe des Querschnitts. Der sehr rasche Abfall der Druckzonenhöhe weist darauf hin, dass es sehr schnell zu einer Rissbildung kommt, auch wenn man eventuell mit bloßem Auge noch keine Risse wahrnehmen kann. Bei weit fortgeschrittener Rissbildung beträgt die Druckzonenhöhe nur mehr einige Millimeter.

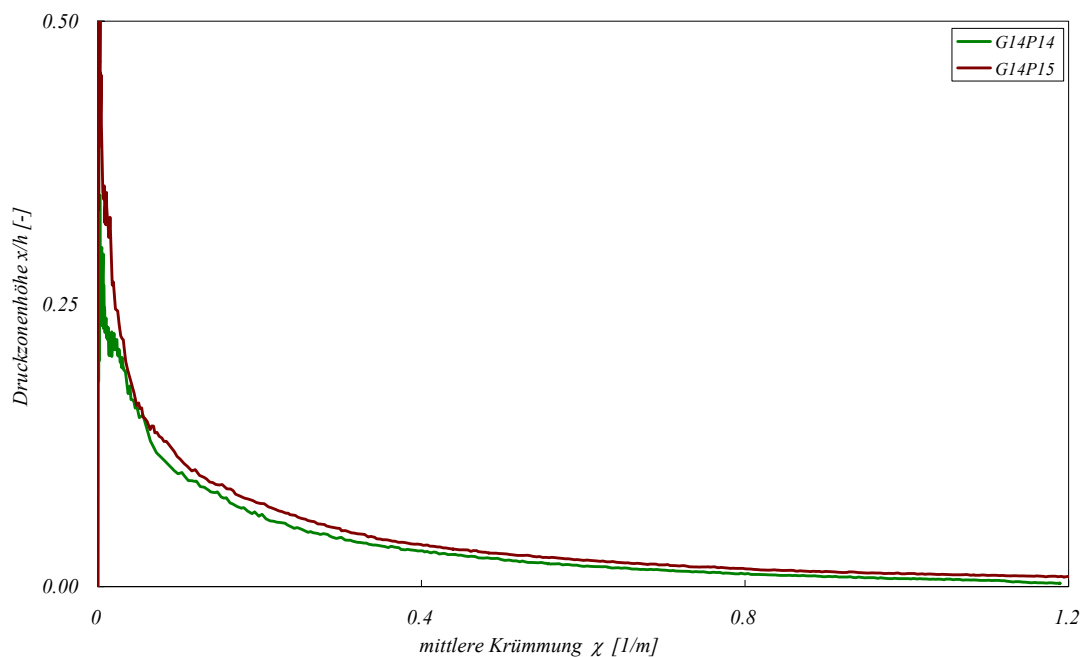


Bild 56: Verringerung der Druckzonenhöhe  $x/h$  bei Steigerung der mittleren Krümmung (Messlänge 100 mm)

In Bild 57 ist das Lastmoment über die Lage der Nullachse dargestellt. Die Lage der Nullachse wird aus der Verformung der auf den Randfasern liegenden Wegmessern berechnet. Bis zu einem Moment von

$$M_{Riss} = \frac{f_{ct,Matrix} \cdot b \cdot h^2}{6} = \frac{8.9 \text{ MPa} \cdot 100^3 \text{ mm}^3}{6} = 1.48 \text{ kNm}$$

ist der Balken ungerissen und der Spannungsverlauf linear-elastisch. Die Nullachse liegt bei 50% der der Balkenhöhe. Dieser Bereich ist im Diagramm nur schematisch dargestellt (gestrichelte Linie), da die nur kleinen Verformungen im ungerissenen Bereich aufgrund einer ungenügenden Auflösung der Wegmesser nicht gemessen werden konnten. In der Phase der Rissbildung reduziert sich bei steigendem Lastmoment die Druckzonenhöhe bis auf nur mehr 14% der Querschnittshöhe. Bei weiterer Rissöffnung und entsprechend niedrigerem Lastmoment reduziert sich in der Endfestigungsphase die Höhe der Druckzone auf einen marginalen Bruchteil der Querschnittshöhe.

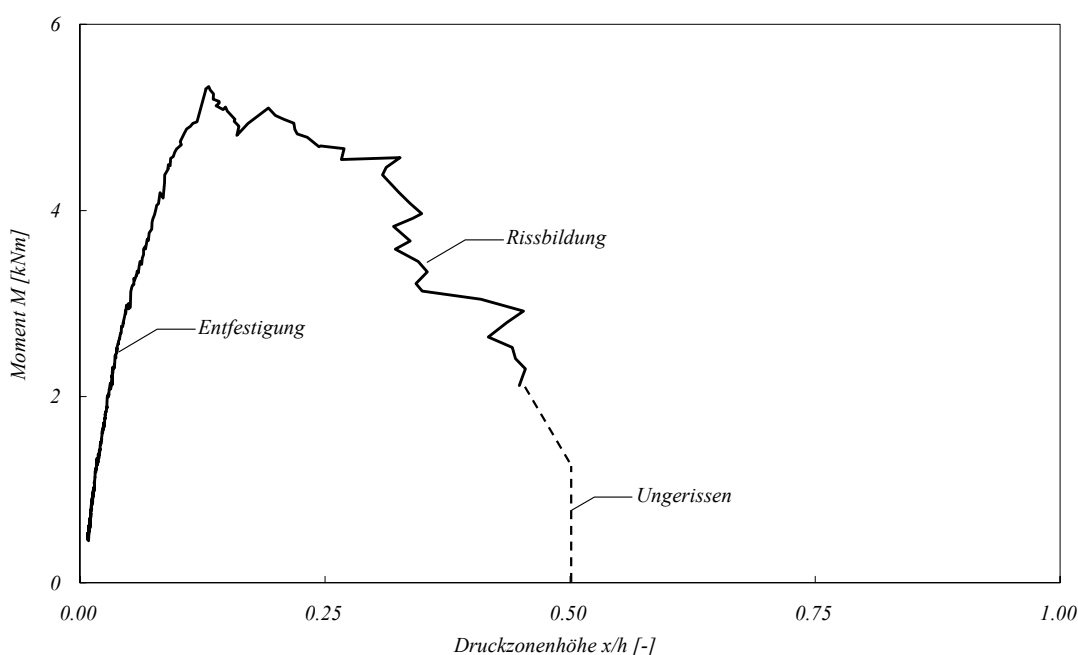


Bild 57: Beziehung von Belastungsmoment und Lage der Dehnungsnullachse

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Biegezugversuch gut als Ersatz für einen Zugversuch genutzt werden kann, da durch den grossen Unterschied zwischen Zug und Druckfestigkeit die Druckzone während des gesamten Versuchs im elastischen Bereich bleibt. Hierdurch kann aus der Messkurve des Biegezugversuches auf die Materialkurve der Zugfestigkeit geschossen werden. Die Zugfestigkeit  $f_{ct}$  muss hierbei aus der Biegezugfestigkeit  $f_{ct,flex}$  mit Hilfe eines Umrechnungsfaktors ermittelt werden. Als erste Abschätzung für die hier verwendeten Dimensionen kann  $f_{ct} = 0.3 f_{ct,flex}$  angesetzt werden.

## 6.2 DREI – PUNKT BIEGEVERSUCH

### PROBEKÖRPER UND VERSUCHSAUFBAU

Die Prismen (40 x 40 x 160 mm) Typ „Mörtelprobe“ werden in einem 3 Punkt Biegeversuch bis zum Bruch belastet (Auflagerabstand  $l = 109 \text{ mm}$ , Belastungsgeschwindigkeit 40 mm / 150 min) (Prüfverfahren nach SN EN 266 [13]). Von jeder Mischercharge werden hierfür 3 Prismen hergestellt und getestet.



Bild 58: 3 - Punkt Biegeversuch

## ERGEBNISSE

Folgend sind die Ergebnisse der 3 – Punkt Biegeversuche dargestellt. Die angegebene nominelle Biegezugspannung errechnet sich aus

$$\sigma_{ct,flex} = 6 \frac{M}{b \cdot h^3} = 6 \frac{\frac{F \cdot l}{4}}{b \cdot h^3} = 2.5 \cdot 10^{-3} \cdot F$$

Der Mittelwert und die Standardabweichung der 3 Probekörper sind jeweils angegeben. Die Mischercharge 16 wurde ohne Faserbewehrung hergestellt und entsprechend für die Ermittlung des Mittelwertes und der Standardabweichung nicht herangezogen.

Charge NR	13a	13b	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Gesamt
Probe 1	31.5	43.2	32.7	-	26.6	44.4	35.4	39.3	34.3	30.7	37.1	38.2	35.6	41.6	46.1	38.9	51	36	47.9	43.5	
Probe 2	34.5	43.5	34.8	45.7	22.9	36.1	42.9	32.8	32.3	38	41.7	46	44.7	43.5	51.6	52.2	39.6	38.1	57	41.8	
Probe 3	35.2	37.9	30.4	35.8	27.7	43.3	-	38.3	42.2	43.2	52.8	40.9	42.8	46.7	35.4	36.6	49.1	47.8	57.5	50.9	
$\bar{x}$	33.7	41.5	32.6	40.7	25.7	41.3	39.2	36.8	36.3	37.3	43.9	41.7	41.0	43.9	44.4	42.6	46.5	40.6	54.1	45.4	41
s	1.95	3.18	2.17	6.99	2.55	4.51	5.33	3.49	5.24	6.26	8.04	3.97	4.82	2.59	8.27	8.41	6.11	6.32	5.40	4.82	6.62

Tabelle 24: Ergebnisse der 3 - Punkt Biegeversuche; nominelle Biegezugspannung [MPa]

Es zeigt sich eine relative grosse Variation der Messwerte. Die Mittelwerte der einzelnen Mischerchargen, welche jeweils aus 3 Proben ermittelt wurden, variieren zwischen 33.8 MPa und 54.1 MPa, somit dem 1.6 fachen Wert. Diese grosse Streuung ist auch im Histogramm der Verteilung der Messwerte zu erkennen (Bild 59). Als Mittelwert aller Prüf - Mittelwerte ergibt sich eine Festigkeit für den 3 - Punkt Biegezugprüfung von 41 MPa bei einer Standardabweichung von 6.6 MPa.

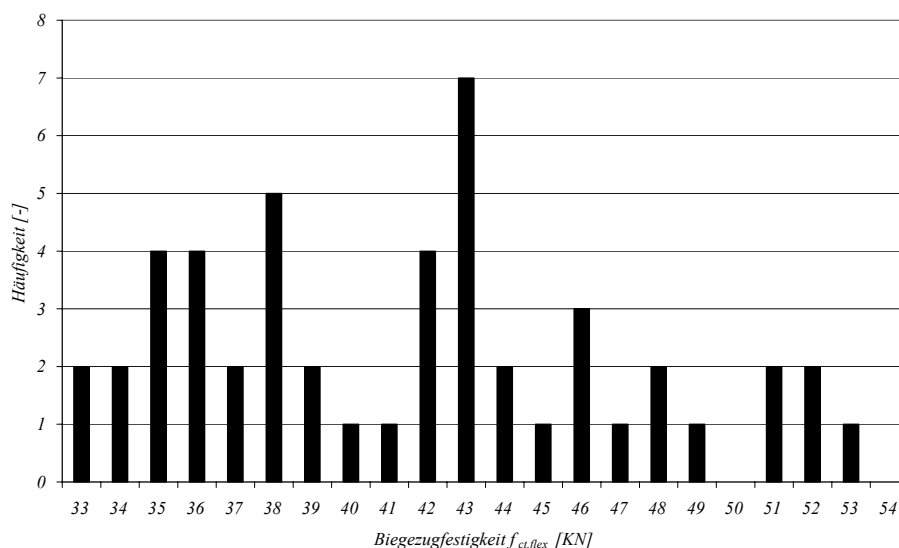


Bild 59: Verteilung der Festigkeit der Proben beim 3 – Punkt Biegeversuche



Bei visueller Betrachtung der zerbrochenen Probekörper konnte man eine starke Orientierung und Nesterbildung der Fasern feststellen. Dies erklärt die beobachtete hohe Streuung der Messergebnisse. Prismen mit einer Kantenlänge von 40 x 40 x 160 mm sind für den 3 – Punkt Biegeversuch zu klein und deshalb nicht geeignet. Aufgrund des Randeffektes sind die Fasern in der kompletten Probe ausgerichtet und nicht gleichmässig verteilt. Für zukünftige Versuche sollten Prismen mit einer Dimension von mindestens 80 x 80 x 320 mm (besser 100 x 100 x 400 mm) eingesetzt werden.

Die unbewehrten Prüfkörper der Chargen 16 weisen eine sehr viel niedrigere Festigkeit mit einem Mittelwert von 25.7 MPa bei einer relativ kleinen Standardabweichung von 2.55 MPa auf. Das Versagen tritt spontan ohne eine duktile Rissbildung ein.

## 7 VERSUCHE MIT BEWEHRUNGSELEMENTEN

### 7.1 ZUGVERSUCHE BEWEHRUNGSSTAHL

Ergänzend zu den Materialversuchen am Werkstoff Beton, wird der verwendete Bewehrungsstahl untersucht. Ziel der Versuche ist es, die Stahleigenschaften für die spätere Untersuchung an den bewehrten Bauteilen genau zu kennen.

#### PROBEKÖRPER UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Es werden vier Bewehrungsstäbe mit einem Durchmesser von 20 mm und eine Länge von 400 mm getestet. Die Versuche werden extern nach SIA Norm [11] durchgeführt. Die Ergebnisse werden in digitaler Form geliefert, wodurch eine genaue Auswertung und eine weitere Verwendung der Materialkurve möglich ist.

#### ERGEBNISSE

Die Messungen umfassen die Kraft, den Maschinenweg und die Verformung eines direkt auf die Probe geklemmten Wegaufnehmers. Bild 60 zeigt das Spannungs – Dehnungsdiagramm (Extensiometer) der 4 Stäbe.

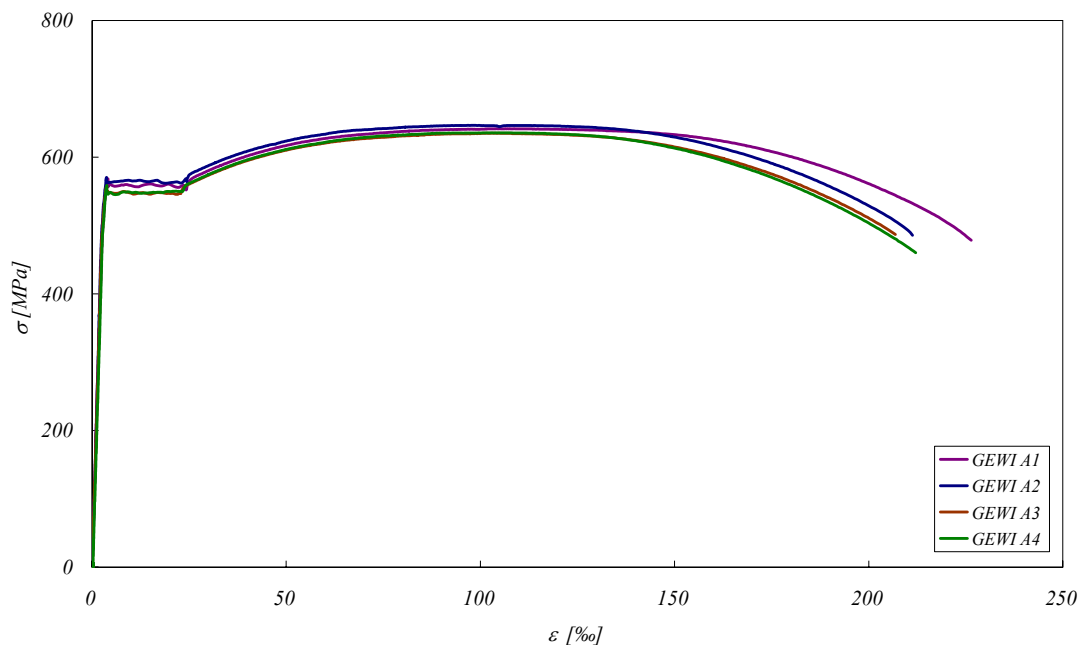


Bild 60: Spannungs- Dehnungslinie der GEWI – Bewehrungsstäbe

Die Kurven der Proben haben den typischen Verlauf eines duktilen Bewehrungsstahls.

In Tabelle 25 sind die Kennwerte der Bewehrungsstähle zusammengefasst:

	$f_s$ [MPa]	$f_t$ [MPa]	$f_t / f_s$ [-]	$e_t$ [‰]	$E$ [GPa]
<b>A1</b>	560	641	1.145	100	190
<b>A2</b>	565	646	1.143	100	211
<b>A3</b>	550	635	1.155	100	195
<b>A4</b>	550	635	1.155	100	192
<b>s</b>	556	639	1.15	100	197
<b><math>\bar{x}</math></b>	7.5	5.3	0.01	0.0	9.6

Tabelle 25: Kennwerte der Bewehrung

## SPANNSTAHL

Die Spannlitzen konnten nicht untersucht werden, da keine dafür geeignete Prüfmaschine zur Verfügung steht. Es werden hier die vom Hersteller VSL angegebenen Kennwerte wiedergegeben (Tabelle 26).

$A$	$f_y$	$f_{tk}$	$e_t$	$E$
[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[‰]	[GPa]
150	1590	1770	35	195

Tabelle 26: Kennwerte der Spannlitzen

## 7.2 BEWEHRUNGS-AUSZIEHVERSUCH

Mit einem Ausziehversuch wird der Verbund zwischen Bewehrungselementen und dem ultrahochfesten Beton untersucht. Mit der daraus ermittelten Verbundfestigkeit kann anschliessend die Rissbildung (Rissabstand, Rissweite) beschrieben und die Krafteinleitungslängen ermittelt werden.

Das in der Norm SN EN 262/1 [11] vorgeschlagene Prüfverfahren kann wegen der hohen Verbundfestigkeit des UHFB nicht verwendet werden. Es würde zu einem Versagen des Stahls durch Überschreiten seiner Fließgrenze  $f_s$  und nicht zum Versagen der Verbundzone kommen. Aus diesem Grund wird ein Versuchsaufbau mit einer, gegenüber der Norm verkürzten Verbundzone eingesetzt.

### PROBEKÖRPER

Die Probekörper bestehen aus Würfeln mit 160 mm Kantenlänge, in die ein Bewehrungsstab bzw. eine Spannlitze zentrisch einbetoniert ist. Als Bewehrungsstäbe kommen Gewindestäbe des Typs GEWI zum Einsatz (Tabelle 27).

	Neiendurehmesser	projez. Rippenfläche	bez. Rippenfläche $f_R$	Rippenabstand
	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[Mpa]	[mm]
Bewehrungsstab	12	154	0.087	7
Bewehrungsstab	20	415	0.087	10
Litze	15.2	-	-	-

Tabelle 27: Eigenschaften der verwendeten Bewehrungsstähle

Für jeden Bewehrungstyp (Ø12 mm, Ø20 mm, Litze 15.7 mm) werden jeweils drei Versuche durchgeführt. Als Parameter der Serien wird jeweils die Verbundlängen variiert (Tabelle 28).

Um eine reduzierte Verbundlänge zu realisieren, wird ein Teil des Bewehrungsstabes mit einem locker sitzenden Kunststoffrohr vom Beton separiert (Bild 61). Das Rohr hat einen Aussendurchmesser von 25 mm (Ø12 mm und Litze) bzw. 30 mm (Ø20 mm).



Bild 61: Herstellen der verbundfreien Länge

## VERSUCHSAUFBAU / VERSUCHSDURCHFÜHRUNG / MESSEINRICHTUNG

Die Probe wird durch Zug an der Bewehrung bis zum Versagen der Verbundfuge belastet. Als Widerlager dient eine Stahlplatte mit zentralem Loch, durch die der Bewehrungsstab geführt wird (Bild 62a-c).

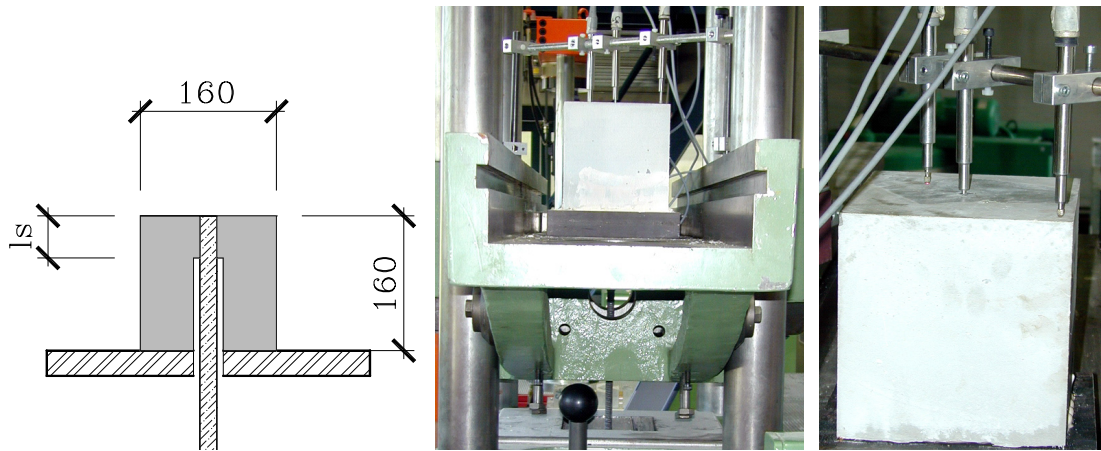


Bild 62a-c: Versuchsaufbau und Messeinrichtung des Ausziehversuchs

Die Belastungsgeschwindigkeit beträgt 0.7 mm/min. Die Belastung und der Schlupf des Stabes auf der Rückseite der Probe werden kontinuierlich aufgezeichnet. Der Schlupf wird als Relativverschiebung zwischen Bewehrung (1 Wegaufnehmer auf dem Bewehrungsstab) und Probenoberfläche (2 Wegaufnehmer) ermittelt.

## VERSAGENSMECHANISMUS

Durch Belastung der Probe kommt es zu einer Relativverschiebung zwischen Probekörper und Bewehrung, dem Schlupf (Bild 63a). Ist die Bewehrung komplett ausgezogen, zeigen sich die Negativabdrücke. Der Abdruck der Oberflächenstruktur der Litze ist deutlich zu sehen. Dieser gleitet, durch seine glatte Oberfläche, aus dem Beton heraus (Bild 63b). Beim Rippenstahl ist hingegen die Oberflächenstruktur des Negativabdrucks glatt geschliffen.

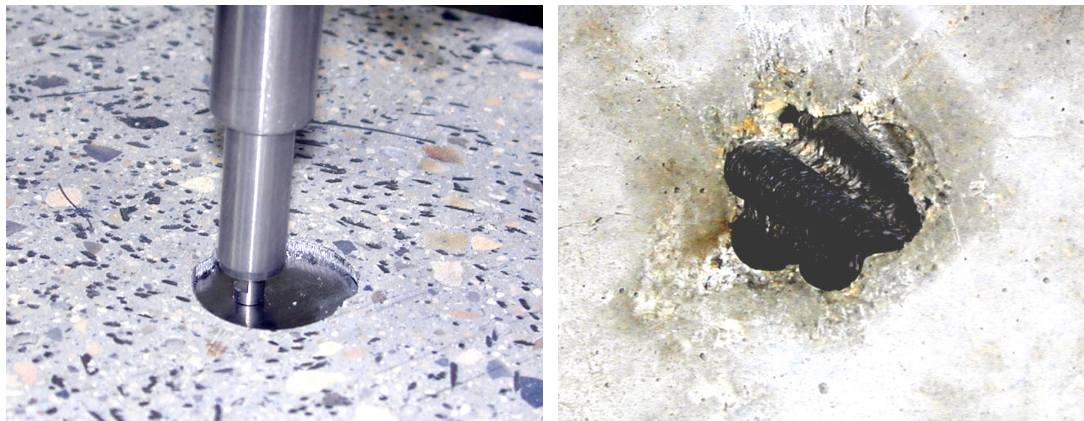
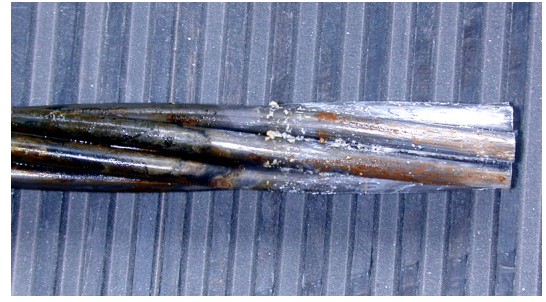
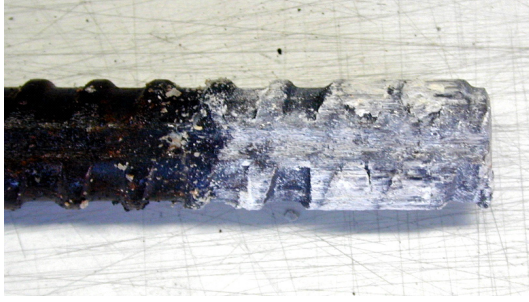


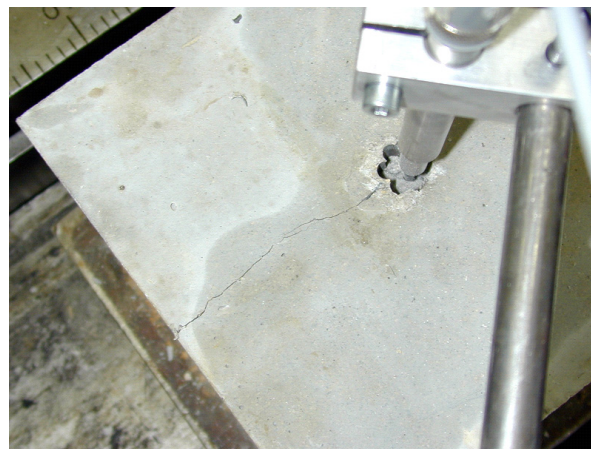
Bild 63a/b: a) Schlupf der Bewehrung, b) Negativabdruck im Beton (Spannstahl)

Betrachtet man die ausgezogenen Bewehrungsstäbe, sind zwischen den Rippen des Bewehrungsstabes die abgesicherten Betonstückchen zu erkennen (Bild 64a). Bei den glatten Spannlitzen befinden sich nur wenige, sehr kleine Betonbrösel zwischen den Drähten (Bild 64b). Die Litzen insbesondere der Proben mit langen Verankerungslängen sind leicht aufgedröselt und dadurch im Durchmesser vergrößert.



*Bild 64 a/b: Ausgezogener Bewehrungsstab bzw. Spannstahl*

Bei einigen der Proben ist das oben bereits erwähnte Phänomen der Spaltung aufgetreten (Bild 65). Aufgrund der sich am Beton abstützenden geneigten Rippen des Bewehrungsstahls kommt es zu einer Querkraft im Beton. Entsprechend kommt es bei den Spannlitzen durch das Aufdröseln zum Öffnen der Litze und einer Querkraft. Überschreitet die daraus resultierende Querkraft die Zugfestigkeit des Betons, kommt es zu einem radialen Längsriss und somit zur Spaltung der Probe.



*Bild 65: Spaltung des Probekörpers (hier bei der Spannstahlprobe)*

## ERGEBNISSE

Bild 66 zeigt die Belastung aufgetragen gegenüber dem Schlupf. Zusätzlich sind jeweils die Fließgrenze und die Streckgrenze der Bewehrungsstäbe ( $\varnothing 12$  mm,  $\varnothing 20$  mm) angegeben.



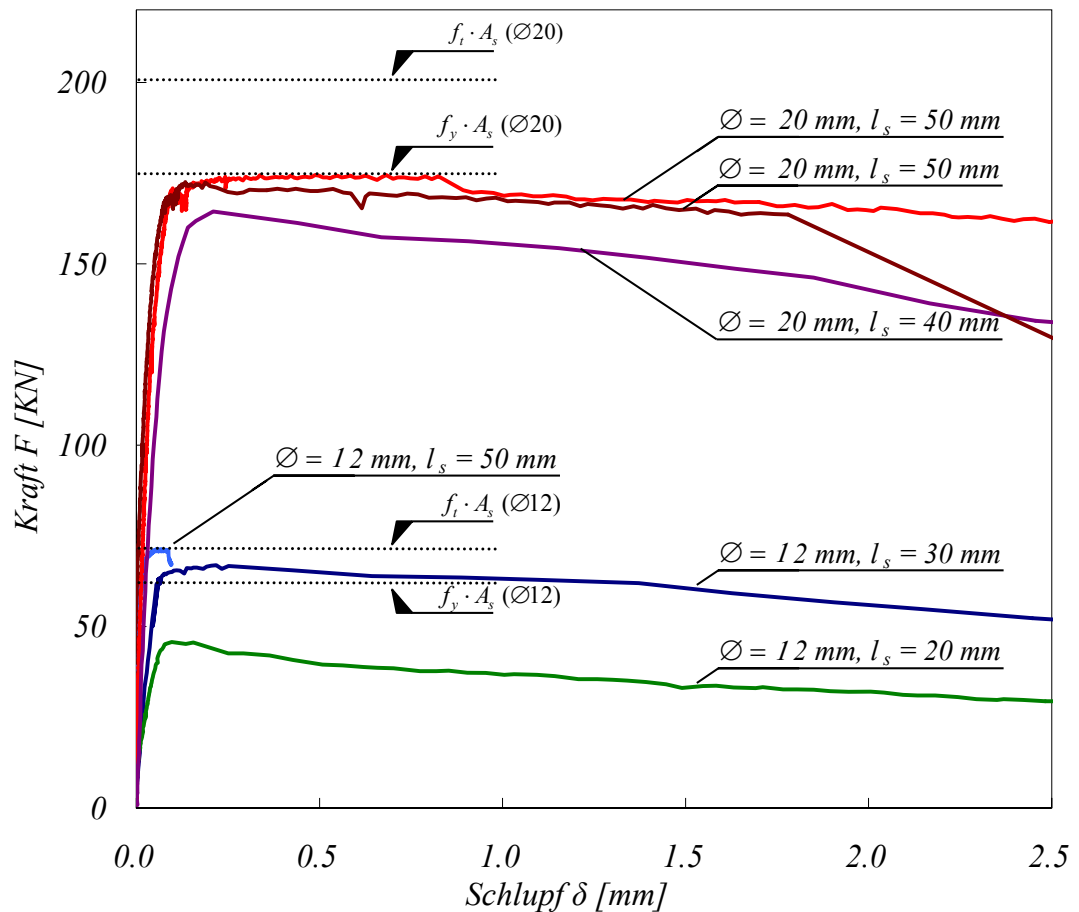


Bild 66: Ausziehversuch der GEWI - Bewehrung

Die Kurven zeigen zunächst einen linearen Anstieg bis zum Erreichen der Ausziehkraft. Nachdem die Verbundfestigkeit erreicht ist, fällt die Kraft bei ansteigendem Schlupf wieder ab.

Mit den gewählten Verbundlängen wird teilweise die Streckgrenze der Stäbe erreicht (G13S1 und G13S4). Bei G13S3 wird die Zugfestigkeit des Bewehrungsstahls erreicht. Die Probe G13S6 wird zunächst normal ausgezogen, versagt dann aber schlagartig durch Spaltung des Betonwürfels (siehe auch Versagensmechanismus Bild 65).

In Tabelle 28 sind die Versuchsergebnisse der Bewehrungs - Ausziehversuche zusammengefasst:

	Typ	Fließgrenze		Streckgrenze		Verbundgeometrie		Verbund		Bemerkung
		$f_s$	$F_s$	$f_t$	$F_t$	$l_b$	$A_b$	$F_b$	$\tau_b$	
	[mm]	[MPa]	[kN]	[MPa]	[kN]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[MPa]	
G13S1	Ø12	556	63	639	72	30	1128	67	59	plastifiziert
G13S2	Ø12	556	63	639	72	20	752	46	61	
G13S3	Ø12	556	63	639	72	50	1880	>71	>38	Abriss der Bewehrung
G13S4	Ø20	556	174	639	201	50	3140	174	55	plastifiziert
G13S5	Ø20	556	174	639	201	40	2512	165	66	
G13S6	Ø20	556	174	639	201	50	3140	171	54	
						Mittelwert (ohne G13S3)			59	

Tabelle 28: Parameter und Ergebnisse der GEWI – Bewehrung Ausziehversuche

Unter der Annahme einer konstanten Verbundspannungsverteilung lässt sich die Verbundfestigkeit aus dem Quotienten von Auszugskraft und Verbundfläche ermitteln. Die Verbundfläche ergibt sich aus dem Produkt des nominellen Umfangs  $U = \varnothing_{\text{nominell}} \cdot \pi$  und der Verbundlänge  $l_b$ . Betrachtet man die durch Verbundversagen ausgerissenen Proben, so ergibt sich eine mittlere Verbundfestigkeit von:

$$\tau_b = \frac{F_b}{\varnothing_{nom} \pi l_b} = 59 \text{ MPa}$$

Im Vergleich mit einem Normalbeton liegt somit die Verbundfestigkeit bei UHFB sehr viel höher.

Aus der mittleren Verbundfestigkeit kann unter Annahme der konstanten Verbundspannungsverteilung die theoretische Verankerungslänge ermittelt werden. Sie gibt die Länge an die benötigt wird um die Kraft in einem Bewehrungsstab bei Erreichen seiner Fließgrenze im Beton zu verankern. Diese ergibt sich zu:

$$l_b = \frac{f_s \varnothing_s}{4 \tau_b} = 2.4 \cdot \varnothing_s$$

Beim glatten Spannstahl versagt der Haftverbund zwischen den Drähten und der Betonmatrix bereits bei einer sehr niedrigen Last (Bild 67). Es folgt eine Phase mit einem relativ grossen Schlupf in der in erster Linie Gleitreibung vorherrscht. Durch die helixförmige Struktur verdreht sich das Kabel bei fortschreitendem Schlupf und verkeilt sich hierdurch. Das Ausziehen erfolgt in mehreren Sprüngen bei steigendem Widerstand.

Der Verlauf konnte aufgrund des Messbereiches des Wegaufnehmers, nur bis zu einem Schlupf von 10 mm beobachtet werden. Die Versuche wurden trotzdem weitergeführt, wobei teilweise eine weitere Steigerung der Ausziehkraft gemessen wurde. Bei Probe G31S7 hat sich der Wegaufnehmer zwischen 0.1 mm und 3.5 mm verhängt. Bei den Proben G31S8 und G31S9 kommt es zur Spaltung des Probekörpers bei bereits weit vorgeschrittenem Schlupf.

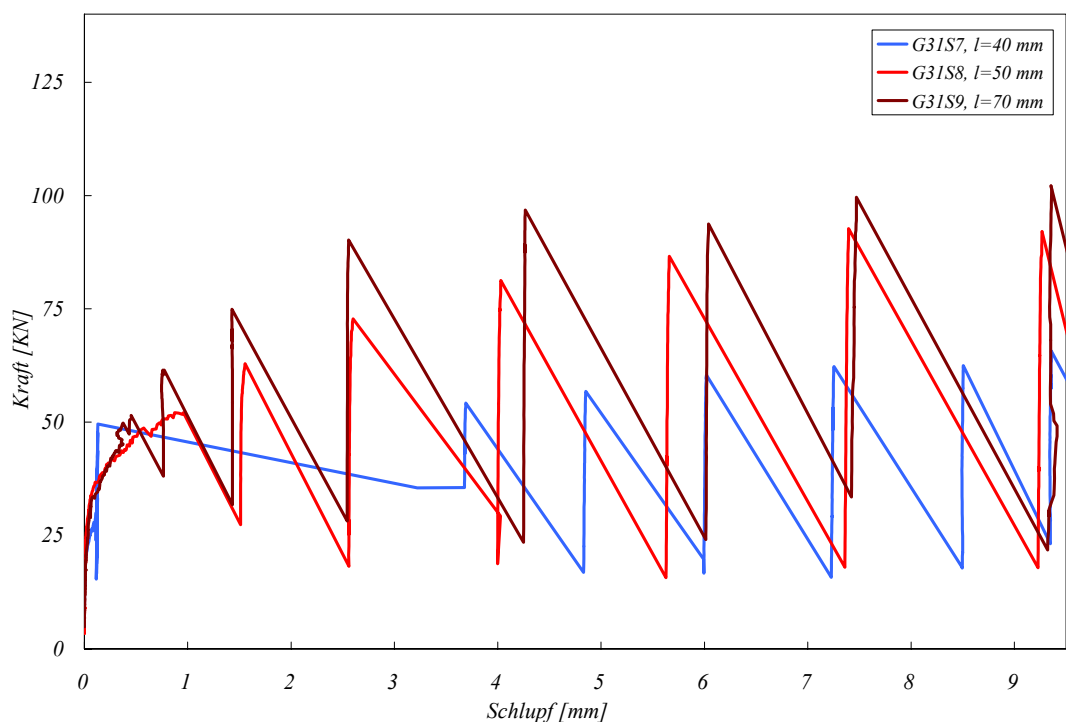


Bild 67: Ausziehversuch des Spannstahls

In Tabelle 29 werden die Messergebnisse zusammengefasst. Es werden 3 unterschiedliche Grenzen ermittelt. Mit ‚Aktivierung‘ wird der erste deutliche Schlupf auf der Probenrückseite bezeichnet. ‚Haftverbund‘ kennzeichnet den Augenblick vor dem ersten Sprung und ‚Verkeilen‘ das Maximum der Sprünge.

	Fließgrenze		Streckgrenze		Verbundgeometrie		Aktivierung		Haftverbund		Verkeilen		Bemerkung
	$f_s$	$F_s$	$f_t$	$F_t$	$l_b$	$A_b$	$F_b$	$f_b$	$F_b$	$f_b$	$F_b$	$\tau_b$	
	[MPa]	[kN]	[MPa]	[kN]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[MPa]	[kN]	[MPa]	[kN]	[MPa]	
<b>G31S7</b>	1590	238	1770	266	40	2600	20	8	30	12	68	26	Wegmesser verhängt
<b>G31S8</b>	1590	238	1770	266	50	3250	23	7	52	16	91	28	spätes Splitting
<b>G31S9</b>	1590	238	1770	266	70	4550	31	7	52	11	134	29	spätes Splitting
$\bar{x}$								<b>7</b>		<b>13</b>		<b>28</b>	

Tabelle 29: Parameter und Ergebnisse der Ausziehversuche mit Litzen 15.7 mm



## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] **Behloul M.**, *Analyse et modélisation du comportement d'un matériau à matrice cimentaire fibrée à ultra hautes performances*, E.N.S. Cachan, PhD thesis, 182 p., Cachan, France, **1996**
- [2] **CEB**, *CEB-FIP Model Code 1990*, CEB (Comité euro-international du béton), Thomas Telford Publishing, **1993**.
- [3] **Habel K., Gysler R., Denarié E., Brühwiler E.**, *A uniaxial tensile test for Advanced Cementitious Materials*, interner Bericht, 8 p., **2002**.
- [4] **Hars E., Muttoni A.**, *Etude préliminaire sur la résistance à l'effort tranchant des poutres précontraintes à âme mince*, Rapport OFROU, 41pp., Lausanne, Schweiz, **2001**.
- [5] **Marti P., Alvarez M., Kaufmann W., Sigrist V.**, *Tragverhalten von Stahlbeton*, IBK Spezialpublikation, 008, pp.50-53, Zürich, Schweiz, **1999**.
- [6] **Muttoni A., Schwartz J., Thürlimann B.**, *Bemessung von Betontragwerken mit Spannungsfeldern*, Birkhäuser, Design of Concrete Structures with Stress Fields, 145 pp, Basel, Schweiz, **1997**.
- [7] **Pfyl Th.**, *Tragverhalten von Stahlfaserbeton*, IBK-Bericht, PhD thesis, Nr. 279, 140 p., Zürich, Schweiz, **2003**.
- [8] **Pfyl Th., Marti P.**, *Versuche an stahlfaserverstärkten Stahlbetonelementen*, IBK Bericht, 268, 137, Zürich, Schweiz, **2002**.
- [9] **Plumey S., Jungwirth J., Muttoni A.**, *Comportement des éléments en béton à ultra hautes performances*, EPFL-IS-BETON, Lausanne, **2002**
- [10] **SETRA, AFGC** , *Béton fibrés à ultra-hautes performances*, recommandations provisoires , 152, Frankreich, **2002**.
- [11] **SN EN 262/1: 2003**, *Betonbau - Ergänzende Festlegungen*, SIA 261/1, Zürich, Schweiz, **2003**.
- [12] **SN EN 262: 2003**, *Betonbauten*, SIA 262, 76 pp., Zürich, Schweiz, **2003**.
- [13] **SN EN 266: 2003**, *Mauerwerk*, SIA 266, Zürich, Schweiz, **2003**.

## DANKSAGUNG

Das Forschungsprojekt ‚ultrahochfester Beton‘, in dessen Rahmen die hier dargestellten Versuche realisiert werden konnten, wird vom Verband der Schweizer Zementindustrie CEMSUISSE unterstützt und finanziert. Hierfür gilt ihnen unser grosser Dank.

Das IS - BETON bedankt sich bei den Firmen Eiffage und SIKA für die kostenlose Bereitstellung ihres ultrahochfesten Betons BSI®/CERACEM, sowie der Firma VSL für die Bereitstellung der Litzen und der Spannvorrichtung.

Ein grosser Dank gilt auch den Studenten Daniel Stirnimann, Matthias Neukomm und Jacques Seywert, sowie dem Mechaniker - Team des IS für die grosse Hilfe bei den umfangreichen Laborarbeiten.